

ISSN/2499-5347

**R. ZONA, G. ROSI, A. SANTAGATA**

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare  
Laboratorio Reattori Nucleari di Ricerca  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

## BREVE STORIA DEL "TAPIRO"

RT/2021/10/ENEA

**ENEA**

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

R. ZONA, G. ROSI, A. SANTAGATA

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare  
Laboratorio Reattori Nucleari di Ricerca  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

## BREVE STORIA DEL "TAPIRO"

RT/2021/10/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## BREVE STORIA DEL "TAPIRO"

Rinaldo Zona

### Riassunto

Il Reattore Sorgente Veloce Taratura Pila Rapida a potenza zero (R.S.V. TAPIRO) fu concepito agli inizi degli anni '60 dai ricercatori del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), come strumento di supporto al programma italiano sui reattori veloci. Dall'approvazione del progetto nel 1965, dopo solo 5 anni e mezzo, il 2 aprile del 1971 il TAPIRO produsse il suo primo flusso stabile di neutroni raggiungendo la sua prima criticità. Da allora, il reattore nucleare di ricerca TAPIRO è stato utilizzato come sorgente di neutroni veloci per diverse attività di ricerca nell'ambito dell'aerospazio, della fusione nucleare, del bruciamento degli attinidi minori, degli acceleratori di particelle, della misura di sezioni d'urto, del danneggiamento biologico... Questo documento raccoglie la storia delle prime fasi di progettazione e realizzazione dell'impianto e le principali attività effettuate nei successivi 50 anni. A completare il documento c'è un elenco della documentazione tecnica prodotta nella fase di progettazione e delle pubblicazioni realizzate sulla base dei risultati sperimentali ottenuti con i neutroni prodotti dal TAPIRO.

**Parole chiave:** R.S.V. TAPIRO, Reattore Sorgente Veloce Taratura Pila Rapida Potenza Zero, Reattori di ricerca a potenza zero, Reattori veloci, Reattori Nucleari di Ricerca.

### Abstract

*The zero-power fast research reactor TAPIRO was conceived in the early 1960s by the researchers of the Italian National Committee for Nuclear Energy (CNEN) to assist the Italian program on fast nuclear reactors. After the approval of the project in 1965, only 5 and a half years later, on April 2, 1971, TAPIRO provided its first stable neutron flux reaching its first criticality. Since then, the TAPIRO nuclear research reactor has been used as a source of fast neutrons for several research activities in the fields of aerospace, nuclear fusion, burning of minor actinides, particle accelerators, neutron cross sections measurement, biological damage ... This document collects the history of the first phases of design and construction of the installation and the main activities carried out in the following 50 years. To complete the document there is a list of the technical documentation produced in the design phase and of the publications created on the basis of the experimental results obtained with the neutrons produced by TAPIRO.*

**Keywords:** R.S.V. TAPIRO, Reattore Sorgente Veloce Taratura Pila Rapida Potenza Zero, Zero power research reactor, Nuclear fast reactors, Nuclear Research Reactors.



## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	7
<b>1a PARTE</b> .....	9
<b>1. La progettazione e la costruzione del reattore</b> .....	9
1.1. L'inizio della storia .....	9
1.2. Il gruppo di lavoro .....	9
1.3. Il TAPIRO da 1 kW .....	12
1.4. Il TAPIRO da 5 kW .....	17
1.5. L'approvazione del progetto.....	21
1.6. La fase realizzativa .....	24
1.7. Le difficoltà durante la costruzione .....	29
1.8. Il primo esperimento critico .....	31
1.9. Il costo del TAPIRO.....	32
1.10. NOTE (1a Parte).....	33
<b>2a PARTE</b> .....	35
<b>2. L'esercizio del reattore e l'attività sperimentale</b> .....	35
2.1. Premessa .....	35
2.2. Dall'aprile 1971 (criticità) al novembre 1977 .....	36
2.3. Dal dicembre 1977 al novembre 1982 .....	37
2.4. Dal dicembre 1982 all' ottobre 1985 .....	38
2.5. Dal novembre 1985 al marzo 1994.....	39
2.6. Dall'aprile 1994 al maggio 1997.....	41
2.7. Dal giugno 1997 all'ottobre 2000 .....	43
2.8. Dal novembre 2000 al settembre 2007 .....	45
2.9. Incontro dei "Tapiri" del 04-10-2004 .....	48
2.10. Dall'ottobre 2007 al maggio 2012 .....	48
2.11. Dal giugno 2012 al luglio 2017 .....	49
2.12. NOTE (2a Parte).....	55
<b>3. Il futuro del TAPIRO</b> .....	56
<b>4. Documentazione</b> .....	57
4.1. Elenco dei rapporti di progettazione del TAPIRO .....	57
4.2. Le pubblicazioni del TAPIRO .....	63
<b>5. FIGURE E FOTOGRAFIE</b> .....	80



## INTRODUZIONE

Questa storia è stata scritta attingendo a molti documenti d'epoca e con il contributo di varie persone che hanno fatto parte, a suo tempo, del Gruppo di Lavoro TAPIRO e dei Direttori Responsabili dell'Impianto che si sono succeduti nella lunga vita del reattore.

In ordine alfabetico sono:

Claudio Accorona, Giancarlo Brunori, Teresa Celentano, Luca Falconi, Orlando Fiorani, Marcello Mazza, Bruno Musso, Giancarlo Rosi, Michele Santangelo.

È dedicata ai compagni di lavoro e di un tratto di vita che ci hanno lasciato: Ugo Farinelli, una guida per tutti e un amico per molti, Bruno Musso, che ha dato ancora il suo contributo alla stesura di questo scritto, e i carissimi Sarto, Di Bartolo, Triglia e Di Modugno, ma anche in particolare a tutti quelli che si occupano ora del TAPIRO o si troveranno in futuro a lavorare su questo impianto a cui auguriamo una serena e produttiva attività.

Si ringraziano in modo particolare:

il Dr. Alfonso Santagata per la raccolta della documentazione e la stesura del capitolo finale della seconda parte della storia e delle parti mancanti.

Il Dr. Mario Carta e il Dr. Luca Falconi per l'assistenza nella selezione del materiale raccolto.

L'Ing. Agostino Mathis e l'Ing. Paolo Venditti per le informazioni circa l'approvvigionamento dell'Uranio.

Infine Giancarlo Rosi per la valida assistenza assicurata in ogni fase della redazione di questo documento.

Come si accenna nel testo, nell'ottobre del 2004 i superstiti del gruppo di lavoro che si era occupato della progettazione e costruzione del TAPIRO e il Direttore Responsabile dell'Impianto di quel periodo hanno partecipato, presso il Centro della Casaccia, a un interessante e simpatico incontro con i colleghi in attività (grazie anche all'impegno di Teresa Celentano, storica segretaria del gruppo). Questa riunione fu seguita da altre, fuori dal Centro, perché tutti ricordavano quel periodo come una felice esperienza di lavoro.

In uno di questi incontri, qualche anno dopo, Ugo Farinelli propose ai presenti "... intanto che siamo ancora vivi e ce ne ricordiamo converrebbe scrivere la storia del TAPIRO".

Gli promisi che l'avrei fatto ma, un po' per impegni vari (e per pigrizia), ho cominciato molto tardi a scrivere questa storia, raccogliendo i contributi di tutti. È stato solo nella primavera del 2019, quando ci siamo accorti che nel 2021 il TAPIRO avrebbe compiuto 50 anni di vita operativa.

Se non ho ricordato qualche persona o ho dimenticato qualche contributo, me ne scuso fin d'ora.

Rinaldo Zona

## **BREVE STORIA DEL TAPIRO**

### **1a PARTE**

#### **1. La progettazione e la costruzione del reattore**

##### **1.1. L'inizio della storia**

Tutto è cominciato nella soleggiata primavera del 1963 quando il Prof. Ugo Farinelli, Direttore del Laboratorio Fisica e Calcolo dei Reattori (1), cominciò a fare circolare tra i ricercatori del Centro della Casaccia un sintetico rapporto, l'ANL 6024 "Design and hazard report for the AFSR" proveniente dall'"Argonne National Laboratory" della "U.S. Atomic Energy Commission".

Il rapporto riguardava il progetto e il rapporto preliminare di sicurezza di un piccolo reattore veloce ad alto flusso, per l'appunto l'Argonne Fast Source Reactor (AFSR).

Da questo ebbe inizio una complessa e affascinante avventura che, nel corso degli anni, ha coinvolto moltissime persone e che ha prodotto, sia pur attraverso varie vicissitudini, risultati molto interessanti.

##### **1.2. Il gruppo di lavoro**

Nei mesi seguenti furono eseguiti vari studi per analizzare la fisica di questo reattore.

Si manifestò presto, nell'ambiente del Centro, un generale interesse per la possibilità di disporre di uno strumento, che il CNEN non aveva, che permettesse irraggiamenti in tempi contenuti, anche se in uno spazio sperimentale ristretto, o di modulare, dato che si partiva da neutroni con energia di fissione, lo spettro energetico di interesse per l'esperimento. Con un accordo tra la Divisione Fisica dei Reattori e la Divisione Tecnologia, sottoscritto dai rispettivi Direttori: Dr. Alberto Bracci e Prof. Sergio Barabaschi, il 15 dicembre fu costituito il Gruppo di Lavoro TA.PI.RO (TAratura PIIa Rapida a potenza 0), dotato di un

proprio Regolamento, per la progettazione, costruzione ed avviamento di un reattore sorgente veloce presso il Centro della Casaccia.

Ne facevano parte l'Ing. Bruno Musso, l'Ing. Michele Santangelo, il Dr. Alvaro Palamidessi, l'Ing. Sergio Sarto e l'Ing. Rinaldo Zona che, reduce delle esperienze dell' ISPRA 2, del ROSPO e del RANA, era responsabile dell'unità (Fig.1).

Il Gruppo TAPIRO rispondeva a un Comitato di Gestione, formato dal Prof. Ugo Farinelli, per la Divisione Fisica dei Reattori, e dall'Ing. Pino Bianchi, presto sostituito dall'Ing. Giancamillo Ambrosini, per la Divisione Tecnologia.

Il Comitato si sarebbe riunito con frequenza mensile e cominciò il 18 gennaio del '64, approvando l'organizzazione per il lavoro del Gruppo e un programma per l'elaborazione di un progetto preliminare, inclusa una prima analisi di sicurezza, entro i successivi 4 mesi. In seguito Musso si occuperà di tutto ciò che riguarda il nocciolo e il riflettore e cioè dimensionamento, studio dei transistori, ecc., Sarto della strumentazione e del sistema di controllo, Santangelo dei meccanismi e dell'impianto di raffreddamento e Palamidessi della neutronica e dello schermaggio. Alvaro Palamidessi però lascerà presto il Gruppo per svolgere il servizio militare il 10 febbraio '64.

Il 18 febbraio si tenne una seconda riunione del Comitato, per discutere della struttura del nocciolo del reattore riguardo alla sicurezza del futuro esperimento critico.

Il 2 marzo iniziò invece la serie regolare delle riunioni del Gruppo dedicate all'analisi di argomenti tecnici, e in una di queste furono esaminate in dettaglio le funzioni degli elementi di sicurezza e controllo.

Già dalla terza riunione del Comitato di Gestione, il 24 marzo, fu esaminato lo stato di avanzamento del lavoro, fu allegata alla relazione e al verbale una prima stesura dell'elenco delle parti e dei componenti del reattore, ordinato secondo una classificazione decimale, per tenere sotto controllo lo sviluppo omogeneo del progetto.

Un primo tentativo di preventivo di spesa, che considerava solo i costi di costruzione delle parti dell'impianto, risale ai primi di aprile e fu discusso nella quarta riunione del Comitato. Perciò, dalla raccolta delle relazioni e dei verbali del Comitato di Gestione e del Gruppo di Lavoro, oltre che dai ricordi personali, è stato possibile ricostruire la storia del TAPIRO fino alla sua messa in funzione.

Iniziò anche, fin dalle prime fasi di lavoro, un'attiva collaborazione con diverse unità del Centro su problemi specifici: con il Laboratorio Metallurgia (Dr. Dalmastrì) per i problemi

connessi con la lavorazione dell'Uranio metallico e per l'incamiciatura del nocciolo, con Il Gruppo Elettronica DITE (Ing. Mario Conti) per lo sviluppo dei canali lineari di misura del flusso neutronico, con il Laboratorio Meccanismi di Precisione (Ing. Francesco Roncaglia) per l'assistenza alla progettazione dei meccanismi di controllo, e con il Laboratorio Strumentazione Elettronica (Dr. Furio Fioroni) per la realizzazione dei canali ad impulsi di partenza.

Inoltre si stabilirono proficue collaborazioni con vari ricercatori su argomenti particolari (Augusto Gandini, Agostino Mathis, Enrico Turrini, Nicola Pacilio e molti altri).

Infine, data l'importanza dell'argomento, furono avviati subito contatti con la Divisione Sicurezza e Controlli del CNEN, in particolare con l'Ing. Remo Galvagni e l'Ing. Aldo Cuoco, per sviluppare un'analisi della sicurezza condivisa.

Tra la primavera e l'autunno del '64 furono approfonditi numerosi argomenti come la realizzazione del nocciolo, dei meccanismi di controllo e sicurezza, delle logiche ed interblocchi della strumentazione, della regolazione della temperatura del nocciolo, ecc., e perfezionate le soluzioni di progetto, l'adeguamento alle esigenze sperimentali delle strutture del blocco pila, ecc.

Venne anche discussa l'organizzazione della documentazione da produrre per la conclusione di questa fase preliminare del lavoro in modo da poterla utilizzare per le varie azioni prevedibili (Divisione Sicurezza, Segreteria Generale, ecc.).

Nell'arco del '64 furono eseguiti numerosi studi e verifiche, alcuni di considerevole impegno, su problemi riguardanti la fisica del nocciolo, del riflettore e dello schermo. Su questi temi si stabilì una collaborazione con il Centro di Calcolo del CNEN di Bologna (Ing. Raimondo Manzini) che proseguirà efficacemente anche negli anni successivi.

Insomma, fu un periodo di lavoro intenso e produttivo.

Nell'ottobre del '64 fu ultimato il progetto preliminare (2), che comprendeva una descrizione dell'impianto, un rapporto preliminare di sicurezza, l'elenco delle parti e componenti dell'impianto che costituirà l'indice del progetto, le tavole degli allarmi e relativi interventi (telaio del sistema di strumentazione e controllo), il preventivo di costo per la realizzazione del reattore, ed altri documenti.

Venne anche prodotto un preventivo del personale CNEN necessario nelle varie fasi del progetto e una stima dell'impegno dei laboratori e delle strutture del Centro la cui

collaborazione sarebbe stata necessaria durante il progetto e la realizzazione dell'impianto.

È da notare che in una delle ultime riunioni del Comitato di Gestione dell'anno, Ugo Farinelli chiese di verificare la possibilità di aumentare la potenza del reattore fino a 10 kW. Tuttavia, dopo averla attentamente valutata, fu considerata impercorribile senza cambiare completamente il progetto e in particolare la struttura del nocciolo.

Il 26 e 27 di novembre del '64 il Gruppo fece una missione al CEN (Centre Etudes Nucleaires), di Cadarache del CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), per visitare il reattore sorgente veloce Harmonie, in costruzione in quel Centro, e stabilire rapporti di collaborazione con il gruppo francese incaricato del progetto (F. Storrer, A.P. Schmitt).

### **1.3. Il TAPIRO da 1 kW**

Il TAPIRO progettato in questa fase era simile all'AFSR, con una maggiore attenzione alla sicurezza, alle attrezzature sperimentali e al sistema di controllo.

Ma sarà meglio darne un'idea più precisa. (Fig.2)

- Il nocciolo è un cilindro a bordi arrotondati di Uranio metallico arricchito al 93.5% in  $^{235}\text{U}$ , con un diametro di 122.4 mm, un'altezza di 106.5 mm e quindi con un volume di poco più di un litro e con una massa complessiva di 23.2 kg.

È incamiciato in acciaio inossidabile dello spessore di 0.3 mm saldato con il procedimento "electron beam" ed è diviso in due parti, una superiore fissa ed una inferiore mobile.

- La parte fissa è realizzata in due elementi alti 38 e 31 mm; quello superiore è strumentato con termocoppie (incamiciate inox) mentre quello inferiore porta un foro diametrale in corrispondenza della mezzeria del nocciolo, di 10 mm di diametro, per realizzare uno spazio sperimentale nella posizione di massimo flusso neutronico.

Una sottile gabbietta di acciaio inossidabile mantiene questa parte del nocciolo fissata alla parte superiore del riflettore.

- La parte mobile è incamiciata solo dopo la determinazione della massa critica, che è raggiunta impilando dei dischi di Uranio, opportunamente dimensionati per ridurre al minimo il numero (sette in tutto, l'uno circa il doppio dell'altro), e consentire, allo stesso tempo, un approccio graduale e sicuro alla massa critica con gradini di reattività controllabili.

La parte mobile, una volta incamiciata, porta sulla faccia superiore una cavità cilindrica centrale del diametro di 30 mm e profonda 4 mm (cavità d'irraggiamento) utilizzabile per attività sperimentali, ma che può essere riempita con una pastiglia di materiale fissile.

- La parte mobile è fissata, sempre con una gabbietta, su una sottostante parte cilindrica di riflettore (tappo di sicurezza) con diametro leggermente superiore, a sua volta montata su un meccanismo verticale, che permette l'avvicinamento lento delle due parti e, per lo spegnimento rapido, il distacco veloce, accelerato dall'azione di un cilindro ad aria compressa.

Questo meccanismo, contenuto in un tubo-guida verticale, ha una lunga corsa di 1.5 metri per abbassare il nocciolo inferiore in una posizione dotata di attrezzature per le operazioni di criticità (ed anche per attività sperimentali).

L'asta su cui è montato il tappo di sicurezza è dotata di due cremagliere, azionate da due rocchetti.

Quello per l'avvicinamento rapido è accoppiato a una cremagliera lunga che termina a 150 mm dal fine corsa superiore mentre quello per l'avvicinamento lento è accoppiato ad una cremagliera corta che lavora solo negli ultimi 150 mm di corsa.

I rocchetti sono collegati alla motorizzazione tramite frizioni elettromagnetiche e sono inseriti ed estratti nelle cremagliere da solenoidi che consentono di attuare la logica di avvicinamento.

L'asta è collegata, nella parte inferiore, a un cilindro ad aria compressa, che agisce durante lo sgancio solo nella prima parte della corsa e funziona nella restante parte come smorzatore.

- Il riflettore, costituito da un cilindro a bordi smussati (diametro e altezza di circa 70 cm), in rame rivestito con un sottile strato di nichel, è realizzato in varie sezioni e circonda il nocciolo.

La parte più interna è un cilindro cavo (diametro esterno circa 30 cm), che contiene il nocciolo, nel cui spessore sono ricavati 5 cilindri verticali mobili (del diametro di 5 o 6 cm e lunghi 350-370 mm), che costituiscono le barre di controllo. Due barre sono di sicurezza, azionate da meccanismi rocchetto-cremagliera e dotate di dispositivo di sgancio rapido ad aria compressa, una barra è per la regolazione fine, con lo stesso tipo di meccanismo di azionamento ma privo del dispositivo di sgancio, e due barre sono di calibrazione, ad azionamento manuale.

- Al centro del riflettore l'intercapedine attorno al nocciolo, in cui circola l'aria di raffreddamento che è addotta da due canali assiali, ha la forma di una clessidra. Lo spessore del meato varia da 3 ad 1 mm dagli spigoli arrotondati alle zone diametrali ed assiali. Questo sia per migliorare lo scambio termico, aumentando la velocità del fluido, nelle aree a temperatura più alta, sia per impedire fisicamente che il nocciolo possa assumere, in determinate condizioni accidentali, configurazioni più compatte di quella originale.

- Il riflettore è chiuso in un contenitore di acciaio inossidabile, flangiato superiormente per il montaggio della parte fissa del nocciolo e, nella parte inferiore, collegato alla camera sotto-pila che sarà descritta in seguito.

- Il complesso nocciolo/riflettore è circondato da uno schermo biologico dello spessore di circa 1.5 m in calcestruzzo pesante (3.5 kg/dm<sup>3</sup>), contenuto in una struttura sferica, realizzata in lamiera di acciaio, dove sono ricavati vari spazi sperimentali.

- Un canale diametrale, coassiale con il foro nel nocciolo, che attraversa diametralmente in mezzeria riflettore e schermo.

- Due canali radiali in mezzeria di cui uno con diametro utile di 50 mm che penetra nel riflettore e giunge fino a 20 mm dal nocciolo e l'altro, di dimensioni maggiori (diametro utile 80 mm), che arriva a 150 mm dal nocciolo. Questo secondo canale è alloggiato nell'asse di un più grande canale orizzontale che raggiunge la superficie esterna del riflettore con un diametro utile di 400 mm.

- Un canale tangenziale, con diametro utile di 30 mm, passante a 106 mm dall'asse del nocciolo a una quota di 50 mm sul piano di mezzeria.

Inoltre lo schermo presenta nella parte superiore un grande canale verticale, del diametro di 800 mm, che consente il montaggio/smontaggio del riflettore.

In un settore dello schermo biologico si trova una colonna termica, parallelepipedo di cospicue dimensioni (1.2x1.2x1.5 m<sup>3</sup>), riempita di barre in grafite, che si affaccia al riflettore. È dotata di un proprio involucro in alluminio. La grafite è montata su una slitta dotata di cuscinetti che ne consente l'estrazione per intero e l'allestimento di eventuali dispositivi sperimentali.

Nello schermo biologico sono alloggiati anche il canale che contiene la sorgente neutronica (Am-Be da 5 Ci) e quelli per i due contatori proporzionali e le due camere a ionizzazione compensate.

Il tappo del canale sorgente contiene un meccanismo che permette l'avvicinamento della sorgente al nocciolo in una posizione in cui i rivelatori di flusso neutronico intercettano principalmente i neutroni provenienti da nocciolo.

Sia il canale verticale sia la colonna termica sono dotati trasversalmente di canali, di piccolo diametro, detti di servizio con funzioni ausiliarie alle attività sperimentali.

I canali sperimentali, quando non sono utilizzati, sono riempiti da tappi a diametro variabile, costituiti da un involucro di acciaio riempito con calcestruzzo e spessori di piombo per ricostituire lo schermaggio.

Tutti i canali sono chiusi all'esterno con flange a tenuta, in corrispondenza dell'attraversamento del rivestimento sferico dello schermo.

Questo rivestimento si prolunga inferiormente, sotto il piano della sala reattore, in una camera cilindrica (sotto-pila), del diametro di 2 m e altezza di 2.5 m, dotata di portello stagno, che alloggia tutti i meccanismi di azionamento delle barre e del tappo di sicurezza. Questa camera è collegata superiormente all'involucro del riflettore e in questo modo si realizza un primo contenitore con un elevato livello di tenuta. Il secondo è dato dall'edificio reattore a semi tenuta.

Il nocciolo, che svilupperà una potenza termica di 1 kW, è raffreddato ad aria. Un circuito chiuso in acciaio inossidabile, dotato di un ventilatore (portata 0.03 m<sup>3</sup>/s e prevalenza 1 kg/cm<sup>3</sup>), e di uno scambiatore di calore costituito da un gruppo frigorifero, provvede all'asportazione del calore.

L'aria di raffreddamento viene immessa, attraverso un condotto nel riflettore, nella parte superiore della intercapedine nocciolo-riflettore ed esce dalla parte inferiore attraverso un condotto realizzato nel tappo di sicurezza.

Nella parte centrale dell'intercapedine l'aria raggiunge i 100 m/s. La temperatura in ingresso è di 25°C, quella in uscita di 50°C, il salto medio di temperatura tra aria e parete del nocciolo è di 70°C mentre la temperatura centrale dell'Uranio metallico è di 130°C.

L'impianto di raffreddamento è alloggiato in un locale sottostante il piano della sala reattore, dove si apre anche il portello del sotto-pila.

Un impianto di trattamento dell'aria primaria ne provvede alla filtrazione e all'essiccamento per ridurre l'attivazione ed eliminare la possibilità di condense locali.

L'impianto del reattore è dotato di un circuito ad aria compressa e un impianto scarichi attivi.

Il sistema di strumentazione e controllo per la sua qualità e prestazioni meriterebbe un'ampia descrizione.

Molto sinteticamente si può dire che questo sistema comprende numerosi canali di misura, distribuiti nel blocco pila, nell'impianto e nell'ambiente circostante.

Ne fanno parte i canali di misura neutronici (2 di partenza a impulsi e 2 lineari a corrente), e di altri parametri come: radiazioni, posizione degli organi di controllo, temperatura, portata, pressione, umidità. Sono connessi con un sistema di allarmi e interventi automatici, che assicura il controllo e la sicurezza dell'impianto.

La consolle di controllo, di dimensioni relativamente compatte, è alloggiata in un'apposita saletta da cui è anche possibile un controllo visuale delle attività in corso nella sala reattore.

Un edificio di piccole dimensioni (circa 250 m<sup>2</sup>) ospita la sala reattore, il locale sotterraneo "impianti reattore", la sala controllo e i locali per i servizi ed impianti convenzionali.

La sala reattore è dotata di un impianto di ventilazione a ciclo aperto che la mantiene in depressione sull'esterno con filtri assoluti sullo scarico. L'aria è espulsa attraverso un camino di 15 m.

L'aria aspirata dal locale reattore passa in piccola parte a ventilare il locale "impianti reattore" mentre il rimanente raffredda l'aerotermosto opportunamente intubato.

Il locale sotto-pila ha un sistema di ventilazione indipendente che viene attivato per rendere il locale accessibile al personale.

Il regime di pressioni realizzato dall'impianto di ventilazione è di -15 mm H<sub>2</sub>O nel locale reattore, -20 mm nel locale "impianto reattore" e -25 mm nel locale sotto-pila.

Sono assicurati circa 8 ricambi ora in tutti gli ambienti e circa 30 nel locale "impianti reattore".

In caso d'incidente gli interventi automatici sul sistema di ventilazione consentono all'edificio di assicurare funzioni di contenimento.

Il TAPIRO è inoltre dotato di un locale attrezzato per la decontaminazione e dei normali impianti e servizi convenzionali.

Nel reattore si può raggiungere un livello di flusso neutronico, alla massima potenza (1 kW) e al centro del nocciolo, di  $7.6 \times 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>/s con spettro ad alta energia.

Per l'analisi della sicurezza del TAPIRO non si è seguita la pratica, di origine USA e molto diffusa al tempo, di ipotizzare un massimo credibile incidente ma si è preferito ricorrere a un metodo originale che permette di identificare l'incidente più grave tra quelli possibili.

Vengono considerate, per tutti i componenti dell'impianto, le cause che possano comprometterne la funzione, cioè cause esterne (eventi fisici come: allagamenti, incendi, sismi, ecc.), cause interne (guasti e rotture) e cause operative (errori umani), considerando poi gli effetti, diretti o indiretti, che possono influire sul funzionamento dell'impianto.

Viene ottenuta così una casistica di incidenti possibili. A questo punto sono valutati gli effetti degli elementi di sicurezza incorporati nell'impianto e cioè gli elementi intrinseci (barriere fisiche, ecc.), gli interventi automatici previsti nel sistema di controllo e infine le norme operative.

Ne deriva una classe d'incidenti credibili che vengono studiati e si perviene quindi alla definizione del massimo incidente credibile.

Nel caso del TAPIRO, questo è dovuto a un errore umano nella fase della prima criticità, confermando l'importanza dell'attenzione data ai problemi di sicurezza nel progetto di tutto l'impianto.

Il preventivo valutava il costo di realizzazione del reattore, includendo l'edificio ma escludendo il combustibile, in 150 ML di £ con un 15% d'imprevisti.

Il programma temporale stimava in circa 2 anni il tempo di realizzazione.

#### **1.4. II TAPIRO da 5 kW**

Una volta presentato il progetto preliminare al Comitato di Gestione, il Gruppo fu autorizzato a proseguire nel lavoro.

Nella 4a riunione straordinaria del Comitato di Gestione del 22 dicembre 1964 si discusse degli effetti della combustione dell'Uranio nel caso d'incidenti in cui si verificasse la fusione del nocciolo.

Durante una verifica si era, infatti, rilevato un errore di calcolo, per cui il conseguente aumento di pressione nel locale sotto-pila sarebbe stato molto più alto di quanto previsto in precedenza.

Questo evento produsse un'importante svolta nel corso del progetto.

Infatti, tra i diversi interventi presi in considerazione per evitare questa conseguenza, si valutò l'adozione di un raffreddamento del nocciolo con un gas inerte per evitare la presenza di aria.

Questa soluzione permetteva anche di esaminare l'attraente possibilità di un aumento di potenza e quindi di flusso.

Nei primi mesi del '65 fu quindi studiata la possibilità di portare la potenza del reattore fino a 10 kW, ma la difficoltà di estrarre questa potenza da una geometria compatta come quella del nocciolo, senza indurre sollecitazioni termiche eccessive, fecero ripiegare su un aumento a 5 kW.

Il gruppo cominciò quindi a lavorare su questo nuovo obiettivo con molto entusiasmo anche se, come si nota dai verbali delle riunioni del Comitato di quel periodo, emersero alcune perplessità circa i benefici che si sarebbero ottenuti (riduzione dei tempi d'irraggiamento), e la maggiore complessità e costo del progetto.

Intanto il gruppo si arricchiva di nuove presenze; infatti, tra la fine del dicembre '64 e l'inizio del gennaio '65 ne entrarono a fare parte il P.I. Gianfranco Di Bartolo e il P.I. Giancarlo Brunori.

Nell'aprile del '65 le soluzioni studiate permisero di prendere una decisione definitiva circa l'aumento di potenza del reattore a 5 kW (12a riunione del Comitato del 14-04-1965).

Il lavoro proseguì attivamente durante la primavera del '65 per approfondire alcuni temi critici e per rivedere il progetto preliminare nella nuova versione con potenza di 5 kW (Fig.3).

Nei mesi seguenti furono prodotti e distribuiti due rapporti (3) come addendum alla descrizione dell'impianto e all'analisi della sicurezza contenute nei rapporti già editi della versione da 1 kW (la formula dell'addendum permetteva di risparmiare molte pagine dattiloscritte).

Venne anche aggiornato il preventivo di spesa, che passava da 150 a 200 MI, sempre escludendo il combustibile e gli imprevisti.

Le principali modifiche apportate al progetto per aumentare la potenza e adottare una refrigerazione con gas inerte sono state sinteticamente le seguenti:

- Il nocciolo ha sempre la stessa configurazione prevista per il TAPIRO 1 kW ma è realizzato in lega metallica U-Mo, con il 98.5% di U (arricchito al 93.5% in <sup>235</sup>U) e l'1.5% di Molibdeno. Questa lega migliora notevolmente le caratteristiche meccaniche dell'Uranio

metallico per sopportare le sollecitazioni termiche, dovute all'elevato aumento della temperatura centrale conseguente all'aumento di potenza.

Ne deriva un modesto incremento della massa critica (23.14 kg di  $^{235}\text{U}$  corrispondenti a 25.13 kg di lega U-Mo) ed un aumento di qualche millimetro delle dimensioni (diametro 126.2 mm e altezza di 109.7 mm).

- È scelto, quale fluido di raffreddamento, l'elio pressurizzato a 7.5 kg/cm<sup>2</sup> per migliorare lo scambio termico.

- L'involucro a tenuta del riflettore, dovendo contenere He in pressione, è stato ridotto di dimensioni e accoglie solo la parte interna del riflettore costituita dal cilindro di circa 30 cm di diametro che alloggia le barre di controllo.

Questo cilindro contenitore è chiuso nella parte superiore con due flange concentriche che consentono il montaggio della parte fissa del nocciolo e della parte di riflettore interno con le barre di controllo.

La parte interna di riflettore in rame costituisce, in caso d'incidente, uno schermo termico per proteggere l'integrità dell'involucro di contenimento.

L'involucro a tenuta è collegato al tubo guida del tappo di sicurezza, alle parti terminali dei canali diametrale e tangenziale e al circuito di refrigerazione che completano il primo contenimento.

- Il solo meccanismo del tappo di sicurezza è modificato senza alterarne la struttura. Il tubo-guida e il corpo stesso del meccanismo sono previsti a tenuta, perché in comunicazione con il circuito dell'He e dimensionati per una pressione massima di 10 kg/cm<sup>2</sup>.

L'azionamento è stato semplificato (Fig.4) con due rocchetti che s'impegnano su una sola cremagliera con un interasse pari alla lunghezza della corsa lenta (150 mm).

Il rocchetto superiore è quello per l'avvicinamento veloce ed è realizzato in modo che, giunto al termine della cremagliera sia a 150 mm dal fine corsa e non possa più procedere fisicamente. Viene perciò estratto da un solenoide dopo l'inserimento del rocchetto lento. Per l'allontanamento lento del tappo di sicurezza la procedura s'inverte.

Due cilindri ad aria compressa, montati lateralmente e agganciati all'asta delle cremagliere con una traversa, sostituiscono il cilindro unico per l'accelerazione nello sgancio rapido (10 g). L'azione di rallentamento è assicurata da un cilindro smorzatore connesso con

l'estremità inferiore dell'asta. Anche il cilindro smorzatore lavora in atmosfera di elio perché in comunicazione con il tubo guida e quindi con il circuito di raffreddamento.

Vari componenti del meccanismo vengono verificati per gli effetti della forte accelerazione impressa.

- Il canale diametrale, poiché comunicante con l'intercapedine del nocciolo, è dimensionato per 10 kg/cm<sup>2</sup> ed è dotato di chiusure a tenuta proporzionate.

Il rivestimento di acciaio dello schermo biologico è collegato alla struttura del sotto-pila e realizza il secondo contenimento.

- Il raffreddamento del nocciolo è realizzato mediante circolazione forzata di He in ciclo chiuso. Il circuito di raffreddamento deve asportare una potenza di 5 kW e lavora ad una pressione massima di 10 kg/cm<sup>2</sup>. Un turbocompressore assicura una portata di He di 100 g/s a 7.5 kg/cm<sup>2</sup>, con una prevalenza di 0.8 kg/cm<sup>2</sup>. Due scambiatori di calore sono installati nel circuito, a valle del circolatore, per asportare la potenza generata dal nocciolo ma soprattutto dal circolatore che è piuttosto elevata.

Il flusso d'elio incontra un primo scambiatore elio-aria che sfrutta l'aria di ventilazione dell'edificio come nel TAPIRO a 1 kW, il secondo scambiatore è uno scambiatore elio-freon dotato di un gruppo frigorifero.

In caso d'incidente il circuito viene automaticamente isolato da due elettrovalvole.

Anche nella versione a 5 kW il refrigerante viene immesso nell'intercapedine nocciolo-riflettore nella parte superiore e ne esce attraverso il tappo di sicurezza.

Con questa potenza di funzionamento la temperatura d'ingresso è di circa 25°C e quella di uscita di 35°C. Il salto di temperatura tra elio e camicia del nocciolo è di 40°C mentre la temperatura al centro nocciolo raggiunge i 250°C.

Nell'intercapedine tra riflettore e nocciolo, nelle aree più ristrette della clessidra, il fluido refrigerante raggiunge velocità soniche.

Si vede quindi come l'asportazione di una pur modesta potenza, generata in un nocciolo molto compatto, richiede un impegno di potenza ben superiore a quella generata.

L'impianto di trattamento dell'aria viene sostituito dall'impianto di stoccaggio del gas inerte.

I vari impianti ausiliari e di servizio del reattore non hanno subito modifiche importanti ma revisioni o adeguamenti.

Alcune modifiche sono state apportate al sistema di strumentazione e controllo dell'impianto soprattutto per quanto riguarda la parte convenzionale per l'introduzione di

nuovi parametri da controllare, dovuti all'adozione del gas inerte per il raffreddamento o a nuove o differenti logiche d'intervento.

L'edificio e l'impianto di ventilazione continuano ad assicurare la funzione di terzo contenimento.

Naturalmente, come si è accennato, fu necessario rivedere anche l'analisi di sicurezza ma senza variazioni rilevanti riguardo al massimo credibile incidente, poiché è stato ipotizzato che possa avvenire durante la fase di caricamento dei dischi di U nel corso del primo esperimento critico.

### **1.5. L'approvazione del progetto**

Nel primo semestre del '65 fu preparata tutta la documentazione da presentare alla Commissione Direttiva del CNEN per ottenere l'approvazione del progetto, ed effettivamente il 4 giugno del 1965 la Commissione, nella sua 59ma riunione (per la storia), decise: "la costruzione di un reattore sorgente veloce, denominato TAPIRO, presso il Centro della Casaccia".

La delibera venne resa ufficiale il 18 giugno con una lettera (Fig.5) del Segretario Generale a tutti gli enti interessati.

Furono stanziati 210 ML tra il '66 e il '67, escluse le spese di personale, ma incluso il combustibile; inoltre erano previsti 30 ML per spese di progettazione costruttiva. Era un po' meno di quanto richiesto, ma un fondamentale passo avanti nella realizzazione del TAPIRO.

Si avviò perciò subito la preparazione delle specifiche per l'ordine e la costruzione delle parti e dei componenti del reattore.

Con il rientro del Dr. Palamidessi vennero eseguite nel giugno del '65 le prove sperimentali per selezionare il materiale inerte (minerale di ferro), per la realizzazione dello schermo, utilizzando i campioni cortesemente forniti dall'Italsider.

Alla conclusione di questo programma si optò invece per un minerale di bario (Barite) che assicurava le migliori prestazioni per l'abbattimento sia del flusso neutronico sia gamma.

Va ricordato che Alvaro Palamidessi non si limitò ad analizzare tutta la parte teorica per il dimensionamento dello schermaggio ma collaborò con entusiasmo alle prove e poi alla realizzazione fisica dello stesso (Fig.6).

In questo periodo furono avviate anche delle prove su componenti dei meccanismi di controllo per raccogliere dati necessari allo sviluppo de progetto costruttivo.

Per la programmazione dei lavori, Di Bartolo preparò un programma che trasformava automaticamente i risultati del PERT (IBM) in un più leggibile diagramma di Gantt.

L'Ing. Gianfranco Franco, Direttore del Centro, convocò per i primi di luglio una riunione per rendere ufficiale la collaborazione con le strutture del Centro, che avrebbero realizzato l'edificio e gli impianti convenzionali (Ing. Gino Vescia, Ing. F. Bragalone, e altri) e con i Laboratori di Fisica e Ingegneria Sanitaria (Dr. S. Tagliati, Dr. G. Branca), che si sarebbero occupati degli aspetti di protezione dalle radiazioni. Queste collaborazioni proseguirono negli anni successivi con efficaci risultati.

Venne anche decisa l'ubicazione definitiva del reattore nell'area del Centro della Casaccia. Durante tutto il periodo di progettazione si svolse un'intensa attività di sperimentazione e messa a punto di codici e librerie di calcolo per lo studio dei transitori accidentali nel nocciolo e delle loro conseguenze fisiche, per il dimensionamento del riflettore e in particolare dello schermo.

Notevole attenzione richiese anche il dimensionamento e la scelta della sorgente di neutroni necessaria per l'avviamento del reattore.

La presenza al Centro di Calcolo della Dr.ssa Adriana Zona (gemella di Rinaldo) può darsi sia stata di qualche utilità per accelerare l'esecuzione dei calcoli del TAPIRO.

In agosto Musso fu invitato a partecipare al primo esperimento critico del reattore Harmonie e all'esame dei relativi risultati nell'ambito della collaborazione con il CEA.

Durante il suo lavoro nello studio dei transitori accidentali del reattore, Bruno Musso si era trovato a disporre di un solo dato relativo alla tensione di vapore dell'Uranio metallico disponibile in bibliografia (4) e quindi era costretto a lavorare con curve ipotetiche. Un secondo dato sarebbe stato di notevole utilità.

Poiché quello disponibile proveniva dagli studi di due importanti e noti ricercatori dell'Argonne National Laboratory, J.J. Katz ed E. Rabinowitz (autori di "The Chemistry of Uranium"-1950), venne loro inviata una lettera chiedendo se, nel corso delle loro recente attività di ricerca, fosse stato determinato qualche altro punto di tensione di vapore dell'Uranio. La risposta positiva giunse nel giro di qualche settimana.

Il passaggio alla fase realizzativa portò all'ordine del giorno di numerose riunioni sul problema, sempre presente nella storia del TAPIRO, della ricerca di personale anche a tempo parziale.

Alla fine del '65 furono trasferiti al Gruppo TAPIRO il Geom. Giancarlo Caselli, il P. I. Marcello Mazza ed il Sig. Teobaldo Tarantini.

Fu un'importante integrazione del gruppo perché Mazza e Tarantini avrebbero lavorato con l'Ing. Sarto alla realizzazione del sistema di strumentazione e controllo fino al completamento dell'impianto.

Il 9 dicembre '65 fu assegnata al TAPIRO la Sig.na Teresa Celentano (giovanissima), che sarà la storica segretaria del Gruppo fino alla messa in funzione.

L'assegnazione di una segretaria certificava anche il riconoscimento dello "status" di unità di un certo livello del gruppo di lavoro nell'ambito del Centro.

D'altra parte all'epoca non esistevano personal computer e tutto il lavoro dalla lettera al documento passava attraverso la macchina da scrivere.

Iniziò a fine '65 anche la produzione della documentazione sotto forma di Rapporti Interni R.S.V. TAPIRO (5), mentre fino a quel momento i documenti erano stati prevalentemente emessi dal Dipartimento Fisica dei Reattori o come semplici relazioni.

Si produssero nell'arco degli anni una sessantina di rapporti che, oltre al numero di archivio, riportavano la classificazione decimale dell'elenco parti e componenti dell'impianto per associare il documento all'elemento del reattore interessato. Questo sistema verrà poi esteso all'archiviazione dei documenti prodotti dai fornitori.

Nel '66 vennero intensificate le prove, peraltro già iniziate da tempo, presso il Laboratorio di Metallurgia per la produzione dei dischi di Uranio metallico che costituiranno il nocciolo e per la formatura, assemblaggio e saldatura della incamiciatura in acciaio inossidabile.

Presso il Gruppo Elettronica e il Laboratorio Strumentazione Elettronica si avviò la realizzazione dei canali nucleari e delle linee di monitoraggio delle radiazioni.

La primavera del 1966 fu densa di attività e di alcuni interessanti avvenimenti. Venne, infatti, avanzata alla Divisione Sicurezza e Controlli la richiesta formale di autorizzazione alla costruzione, presentando il Rapporto di Sicurezza Preliminare.

Vi furono numerosi incontri e scambi di lettere con la Direzione del CNEN, per preparare un preventivo che tenesse conto delle spese di personale, dell'acquisto o affitto del combustibile, problema piuttosto rilevante, e una valutazione dei costi di esercizio.

Inoltre questi contatti servirono per sollecitare l'effettiva disponibilità di fondi e attivare la ricerca interna del personale da assegnare temporaneamente alla task force.

Vennero formalizzate le commesse di lavoro ai Laboratori del Centro impegnati nella realizzazione di parti del reattore (nocciolo, strumentazione nucleare, ecc.).

L'Argonne National Laboratory chiese una copia dei disegni costruttivi dei meccanismi di controllo, che adottavano delle soluzioni originali, per sostituire quelli dell'AFSR.

Una delegazione di Harmonie venne al Centro della Casaccia per discutere dei futuri programmi sperimentali e porre le basi per una collaborazione.

## **1.6. La fase realizzativa**

I primi mesi del '66 videro uno sviluppo del progetto in particolare anche per la strumentazione nucleare, una messa a punto del quadro complessivo degli allarmi, degli interventi automatici di sicurezza e degli interblocchi, ed un affinamento dello studio del massimo credibile incidente.

Il primo aprile '66 l'Ing. Zona venne incaricato della direzione del progetto PEC (Reattore Prova Elementi di Combustibile), presso il Programma Reattori Veloci del CNEN a Bologna, e l'Ing. Musso assunse la responsabilità del TAPIRO.

Il Gruppo TAPIRO avrebbe fatto capo a un nuovo Comitato di Gestione TAPIRO costituito dal Prof. Farinelli, dall'Ing. Renzo Tasselli e dall'Ing. Zona con riunioni mensili (il precedente Comitato di Gestione aveva tenuto 14 riunioni): Zona sarebbe rientrato regolarmente alla Casaccia per parteciparvi.

La prima riunione di questo comitato (denominato con scarsa originalità 2° Comitato di Gestione), si tenne il 29 aprile e l'esame della situazione forniva il seguente quadro: un buon avanzamento del progetto costruttivo, l'avvio delle procedure per l'acquisizione del combustibile, attività questa gestita dalla DAISE (Divisione Affari Internazionali e Studi Economici del CNEN), l'inoltro al Ministero dell'Industria della richiesta di autorizzazione alla Costruzione tramite la Divisione Sicurezza.

Il programma PERT aggiornato prevedeva 25 mesi per il completamento del reattore.

Si segnalava però che il capitolo di spesa "TAPIRO" era purtroppo ancora bloccato e non era quindi possibile emettere ordini.

Durante il '66 diversi periti e disegnatori, anche per tempi molto brevi, fecero temporaneamente parte del Gruppo (Sig. Rovati, Sig. Rossignoli).

Collaborarono più a lungo il Sig. Canzi e l'anziano Sig. Vincenzo Triglia, apprezzato da tutti.

In luglio Musso e Sarto andarono in missione al Centro di Cadarache, per conoscere in dettaglio i problemi di funzionamento che si erano verificati nel reattore Harmonie dopo la criticità. Risultarono quasi tutti dovuti a difetti del sistema di strumentazione e controllo, che dovette essere interamente sostituito.

Furono quindi raccolte informazioni molto interessanti; in particolare fu notato che, nel progetto TAPIRO, si stava prestando maggiore attenzione ai problemi della sicurezza, in particolare a quella legata con la normale operazione dell'impianto e delle attività sperimentali che vi sarebbero state svolte.

Nel corso dell'estate, ottenuta finalmente la disponibilità dei fondi, furono emessi i primi ordini e fu sollecitata presso il Comune di Roma la pratica della licenza edilizia.

Entro la fine del '66 fu perciò possibile avviare le gare per l'assegnazione della costruzione dei componenti e delle parti principali, inclusa la lavorazione del nocciolo, e si impegnarono tutti i fondi assegnati.

Tuttavia il ritardo della licenza edilizia produsse uno slittamento di 4 mesi sull'inizio dei lavori per l'edificio reattore, dato che questa attività si trovava all'inizio della linea critica.

Si decise anche che il montaggio della strumentazione e della consolle sarebbe stato eseguito direttamente dal gruppo di lavoro (Mazza e Tarantini) con la supervisione dell'Ing. Sarto. Si decise altresì che la costruzione del meccanismo per l'inserimento e l'estrazione della sorgente sarebbe stato realizzato presso l'officina del Centro.

Nel corso dell'anno proseguirono o furono avviate, presso il Laboratorio Ingegneria Reattori, diverse prove sperimentali con l'obiettivo di verificare le prestazioni e l'affidabilità di vari componenti (guarnizioni metalliche, frizioni e valvole elettromagnetiche, cilindri pneumatici, ecc.).

Inoltre furono eseguite estese prove di tenuta e resistenza su particolari dell'incamiciatura del nocciolo presso il Laboratorio Tecnologia Materiali.

Vennero anche eseguite prove estensimetriche e fotoelastiche su prototipi delle gabbiette del nocciolo sottoposte, in determinate condizioni accidentali, a sollecitazioni elevate.

Agli inizi del '67 lo stato di avanzamento era pressappoco il seguente.

Si erano ricevute varie offerte per la lavorazione del nocciolo, dei complessi “riflettore, elementi di controllo, meccanismi, contenitore refrigerante”, “contenitore sotto-pila, schermo, canali, involucro colonna termica” e “circuito raffreddamento”.

Proseguiva intanto l'attività di sviluppo del sistema di strumentazione e controllo presso i Laboratori del Centro.

Il cantiere dell'edificio reattore, per una serie di motivi burocratici, non era ancora stato aperto.

Nell'aprile del '67 Musso e Santangelo andarono in missione a Parigi, Bruxelles e Londra, allo scopo di definire gli aspetti tecnici del contratto per la fabbricazione del nocciolo con la Societe Generale des Minerais (S.G.M.) e con Hispano Suiza, Plannair e Rateau per la fornitura del circolatore dell'He refrigerante.

Venne scelta quest'ultima che aveva sottoposto una macchina (turbocompressore su cuscinetti a gas), proprio della taglia necessaria, ad estese prove e cicli di funzionamento.

Il completamento dell'impianto era previsto per la fine del '68.

Seguì l'assegnazione degli ordini, e alcuni componenti del Gruppo (Santangelo e Sarto) cominciarono a lavorare anche per altri progetti e poterono dedicare al progetto TAPIRO solo una frazione ridotta di tempo.

Vi furono nei mesi seguenti numerosi contatti con la Divisione Sicurezza, per definire la documentazione da predisporre e l'iter relativo, dopo l'autorizzazione generale alla costruzione. Il TAPIRO era il primo caso di applicazione del DPR 185 del 13-2-64 (la prima legge organica in materia di sicurezza degli impianti nucleari).

Nell'estate del '67 si concentrarono diverse azioni.

In luglio iniziarono finalmente i lavori per la costruzione dell'edificio, che proseguirono speditamente (Fig.7), e in agosto fu firmato il contratto con la S.G.M. per la costruzione del nocciolo.

Iniziò anche la costruzione dei complessi “riflettore, ecc.” e “contenitore sottopila, ecc.” presso la BPD (Bombrini Parodi Delfino, una divisione della SNIA), a cui erano stati assegnati. La BPD avrebbe utilizzato la ditta Sant'Andrea di Novara per la meccanica di precisione.

Anche la pratica di approvvigionamento dell'Uranio (in forma di esafluoruro arricchito), presso l'USAEC (United States Atomic Energy Commission), si avviava a conclusione. Si

era trattato di un'operazione complessa ed era stato necessario superare varie difficoltà trattandosi di Uranio altamente arricchito adatto ad applicazioni militari (7).

Nel resto dell'anno il Gruppo TAPIRO fu impegnato nell'aggiornamento del preventivo di spesa e del programma, mentre si stabilivano rapporti regolari con i fornitori e, in ottemperanza al DPR 185, cominciava a lavorare il Collegio dei Delegati alla Sicurezza del Reattore.

Un particolare impegno richiese la stesura delle specifiche di montaggio.

L'inizio del '68 portò nuovi interessanti risultati.

Nella fabbricazione del nocciolo la Nukem aveva eseguito la conversione dell'UF6 arricchito in U metallico, sia pur con un lieve aumento delle impurezze, mentre la S.G.M. aveva completato le prove di fusione dei dischi in lega U-Mo utilizzando dell'Uranio depleto.

L'avanzamento della costruzione dei complessi presso lo stabilimento di Colleferro della BPD procedeva, sia pure con qualche ritardo, mentre alla Casaccia era stato ultimato il cablaggio della consolle di controllo ed era prossima alla consegna la strumentazione nucleare di produzione CNEN.

Nella primavera del '68 i lavori di costruzione dell'edificio consentivano, come da programma, l'inizio del montaggio della carpenteria del blocco reattore.

Furono presentati alla Divisione Sicurezza i Progetti Particolareggiati richiesti (riguardanti quasi tutto l'impianto), che sarebbero dovuti essere esaminati dalla Commissione Tecnica prevista dal DPR 185.

Per quanto riguarda il nocciolo, presso la S.G.M., l'omogeneità della lega U-Mo era stata ottenuta grazie anche al contributo tecnico del Dr. Carlo Fizzotti (Laboratorio Tecnologia Materiali).

Il contenitore sotto-pila era in attesa dell'approvazione dell'ANCC (Associazione Nazionale Controllo Combustione), e una volta ottenuta fu predisposto per l'installazione (Fig.8).

Nel frattempo erano in corso prove presso l'Istituto di Scienza delle Costruzioni dell'Università di Roma per la definizione della composizione del calcestruzzo pesante per lo schermo.

Il variatore di frequenza necessario per l'azionamento del circolatore era stato ordinato alla Pellizzari e sarebbe stato inviato alla Rateau per i collaudi.

Il circuito di refrigerazione era in avanzata costruzione presso la SICLIET.

Notevole impegno richiese l'approvazione dei Progetti Particolareggiati, essendo la Commissione Tecnica alla sua prima esperienza nell'applicazione del DPR 185.

In giugno fu costituito il Gruppo Esercizio Reattore costituito da Claudio Accorona, Giancarlo Rosi, Marcello Mazza e Teobaldo Tarantini che doveva occuparsi della preparazione ed organizzazione dell'esercizio del TAPIRO.

Fu nominato Responsabile dell'Impianto Claudio Accorona (Mazza e Tarantini continuarono tuttavia la loro attività sulla strumentazione con l'Ing. Sarto).

Per quanto riguarda l'avanzamento del cantiere fu possibile iniziare il montaggio della carpenteria del blocco pila che si concluse entro l'anno (Fig.9), (Fig.10), e (Fig.11).

Purtroppo durante l'estate, mentre la realizzazione di varie parti, come l'edificio e i relativi impianti, il nocciolo, il circuito di refrigerazione, i relativi componenti e la strumentazione in generale, procedeva secondo il programma, si verificarono dei gravi problemi con la BPD nella realizzazione dei complessi "riflettore, ecc." e "contenitore sotto-pila, ecc."

Ritardi e vistosi errori nelle lavorazioni portarono allo scambio di una vivace corrispondenza tra Bruno Musso ed i vertici della Società, coinvolgendo anche la Direzione del CNEN.

Inoltre Santangelo aveva lasciato il Gruppo a metà settembre e anche questo complicava la situazione.

In novembre si conclusero le prove presso l'Istituto di Scienza delle Costruzioni dell'Università di Roma per la composizione del calcestruzzo dello schermo biologico (inerte, granulometria, ecc.), con la scelta della barite invece della magnetite.

Era stata anche avviata la costruzione delle apparecchiature di operazione, lo schermo fisso del tappo di sicurezza e lo schermo per la rimozione del nocciolo fisso superiore.

A fine novembre Brunori e Musso andarono in missione a Dessel (Belgio) presso la S.G.M. per l'accettazione dei dischi di Uranio e l'avvio dei collaudi seguiti dall'Ing. Luciano Sala della Divisione Tecnologie.

Per sbloccare l'approvazione dei progetti particolareggiati si richiese l'intervento della Direzione del Centro e della Segreteria Generale che si attivarono efficacemente.

Alla fine dell'anno la lavorazione del nocciolo era stata ultimata ed entro breve avrebbe potuto essere incamiciato e questa linea, dopo tutte le difficoltà iniziali, era in anticipo sui tempi previsti.

In parallelo anche le attività sul sistema di strumentazione e controllo avevano raggiunto uno stadio avanzato di completamento (Fig.12).

La BPD aveva montato tutta la carpenteria del blocco pila (Fig.13) ma i tappi dei canali non erano stati accettati per difetti dimensionali e di lavorazione per cui furono avviate delle ulteriori azioni per risolvere la situazione.

Il Collegio dei Delegati alla Sicurezza del Reattore approvò, con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Roma, il Piano di Emergenza Interna del reattore.

Il Gruppo TAPIRO aveva intanto predisposto: il Regolamento di Esercizio, il Programma di Prove Nucleari e il Manuale di Operazione dell'impianto.

### **1.7. Le difficoltà durante la costruzione**

I problemi con la BPD si protrassero nel 1969, nonostante tutte la azioni fatte per risolverli. Anzi si aggravarono, perché le mancanze di quest'azienda, che pure in precedenti esperienze aveva dato buona prova, si estesero anche alla fase di collaudo.

Questo costrinse il Gruppo TAPIRO a intervenire direttamente, oltre che con personale, anche con attrezzature e strumenti, e questo comportò, dato il numero limitato di addetti, il rallentamento di altre linee di attività. D'altra parte i ritardi provocati dalla BPD azzeravano tutte le altre criticità.

Tuttavia nel corso dell'anno queste difficoltà furono superate e il 2° Comitato di Gestione TAPIRO, nella sua 15a riunione, il 22 settembre del 1969, poteva constatare che l'impianto era pressoché ultimato e il collaudo del circuito di refrigerazione e delle tenute delle strutture di contenimento avrebbe potuto iniziare ai primi di ottobre.

In conclusione, entro l'anno si prevedeva anche la conclusione di tutte le prove non nucleari.

Durante le prove e i collaudi (Fig.14) si rese necessario risolvere alcuni problemi non semplici.

In un caso, ad esempio, per raggiungere il previsto livello di tenuta all'elio in pressione del sotto-pila fu necessario intervenire sui passanti dei cavi. In tutti i casi di conduttore multifilo si dovette ricorrere a un trattamento con resina di un tratto del conduttore stesso per eliminare il passaggio dell'elio nei meati tra i fili.

La criticità della tenuta all'elio fu riscontrata anche su delle superfici in rame del riflettore e fu superata con un trattamento di nichelatura con l'assistenza della Dr.ssa Antonietta Biancifiori.

In un altro caso, nel corso delle prove di sgancio del tappo di sicurezza, non si raggiungeva la richiesta accelerazione di 10g. L'extracorrente di apertura negli avvolgimenti delle elettrovalvole di adduzione dell'aria compressa, provocava un rallentamento.

Il problema fu risolto, con la collaborazione dell'Ing. Angiolo Pulacci, modificando gli alimentatori, aumentando la tensione e riducendo il rapporto induttanza/resistenza.

Intanto nella 15a riunione si prese anche atto che tutta la documentazione finale per le procedure di sicurezza era pronta e in attesa di stampa (6).

Perciò la criticità era all'orizzonte alla fine dell'anno e l'operatività del reattore nel marzo del '70.

Destarono, però preoccupazione le dimissioni di Musso e Tasselli e le responsabilità del Gruppo di lavoro TAPIRO furono ripartite tra Farinelli e Sarto, contando in un aleatorio prestito per qualche mese dell'Ing. Musso da parte della Progettazioni Meccanico Nucleari S.p.a. (Finmeccanica) dove avrebbe lavorato.

Ma le vicissitudini del TAPIRO non erano ancora terminate, anzi si profilava all'orizzonte il periodo peggiore.

In una riunione straordinaria del Comitato, tenutasi eccezionalmente a Bologna presso il Programma Reattori Veloci, il 14 gennaio del '70 l'Ing. Sarto comunicò infatti che, a fine novembre, durante le prove sul circuito, lo smontaggio per ispezione di alcune parti aveva messo in evidenza il danneggiamento anomalo di qualche guarnizione in Alluminio.

Le analisi che erano state condotte stabilivano con certezza che ciò era dovuto alla presenza di Mercurio.

Non essendovi nessuna fonte di Hg nell'impianto, questa presenza doveva risalire a un errore operativo durante il collaudo del circolatore presso la Rateau.

Il Mercurio proveniva dai manometri utilizzati per la misura della prevalenza della macchina, ma al momento la Rateau aveva garantito una totale assenza di Hg nel turbocompressore.

Si rendeva quindi necessario il rinvio della macchina presso il fornitore per un completo smontaggio, pulizia e controllo.

Purtroppo era stata anche accertata una larga contaminazione da Mercurio in tutto l'impianto e questo comportava la necessità di programmare delle estese operazioni di smontaggio, pulizia e verifiche, la sostituzione di alcuni componenti e di tutte le guarnizioni, il decapaggio e la nuova nichelatura del riflettore interno.

La Dr.ssa Biancifiori diede un valido contributo per le analisi e per la definizione delle procedure e dei mezzi da utilizzare per riportare l'impianto in condizioni normali.

Si aggiungeva il problema che i tecnici del Gruppo erano ormai richiesti per altre attività, oltre agli allontanamenti che si erano già verificati.

Insomma il progetto TAPIRO si trovava in una situazione certamente difficile.

### **1.8. Il primo esperimento critico**

La documentazione disponibile s'interrompe a questo punto (risulterebbe che il 2° Comitato di Gestione abbia tenuto 15 riunioni più 2 straordinarie).

Fu certamente necessario tutto l'anno e molto lavoro per ripristinare la situazione esistente a fine '69, lavorando in parallelo sulle parti ancora da completare (Fig.15).

Va anche ricordato che nel frattempo il Gruppo TAPIRO si era praticamente sciolto e le attività di completamento dell'impianto venivano seguite dal Gruppo Esercizio che fece fronte a molti problemi, anche singolari, come il furto del cavo di grossa sezione (poi fortunatamente ritrovato), per l'allacciamento del variatore di frequenza.

Con grande impegno da parte di tutti entro i primi mesi del '71 tutte le parti, componenti e sistemi dell'impianto erano collaudati (Fig.16), (Fig.17), (Fig.18), (Fig.19), (Fig.20), (Fig.21) e tutte le procedure erano state ultimate.

Anche il nocciolo era disponibile e immagazzinato nella struttura di deposito appositamente realizzata.

Finalmente alla fine di marzo tutto era pronto per il primo esperimento critico.

Claudio Accorona coordinava le attività nel reattore assistito da un gruppo di giovani ricercatrici e ricercatori del Laboratorio Fisica dei Reattori, diretti da Ugo Farinelli, che eseguivano l'analisi dei dati e fornivano le indicazioni per procedere nelle successive fasi dell'esperimento.

Dopo il caricamento dei dischi di Uranio, secondo la progressione prevista e dopo la regolare estrazione della sorgente, il reattore raggiunse la criticità alle 11:33 a.m. del 2 aprile 1971 (Fig.22), (Fig. 23), (Fig. 24), (Fig. 25), (Fig. 26).

In quel momento alla consolle dell'impianto l'operatore era Giancarlo Rosi che, anni dopo ammetterà di essersi sentito un po' sotto pressione.

Una piccola folla assisteva in sala controllo e nel corridoio (8). Fuori si svolgeva una manifestazione di dipendenti del CNEN che erano contrari, per motivi oggi dimenticati, alla messa in funzione del reattore.

L'Ing. Gianfranco Franco, Direttore del Centro, sulla porta dell'edificio, discuteva animatamente con i manifestanti più prossimi, sostenendo la necessità di procedere tranquillamente alle operazioni di avviamento, e così avvenne.

### **1.9. Il costo del TAPIRO**

Per quanto riguarda i tempi di realizzazione, le pagine precedenti spiegano tutti i motivi della difficile e lunga gestazione della realizzazione.

Per quanto riguarda i costi invece, è disponibile un aggiornamento del preventivo, predisposto nel gennaio del '68 (9) da cui risulta che l'impianto, incluso l'edificio, avrà un costo di 228 ML (di cui 117 già impegnati), mentre l'acquisto e la lavorazione del combustibile richiederanno 261 ML (di cui 211 già impegnati), per un totale di 489 ML (equivalenti a 252.000 €), escluso il costo del personale CNEN.

È probabile che il costo definitivo non si sia discostato molto da questi dati.

=====

## 1.10. NOTE (1a Parte)

- (1) Presso il Centro di Studi Nucleari della Casaccia del CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare)
- (2) Il progetto preliminare del Reattore Sorgente Veloce TAPIRO (1 kW) è costituito dai seguenti documenti:  
Descrizione DIFIR 36(64), Analisi della sicurezza DIFIR 37(64), Programma sperimentale DIFIR 38(64), Specifiche di progetto DIFIR 39(64)
- (3) Reattore Sorgente Veloce TAPIRO (5 kW); LFCR (65)27 Descrizione / Addendum al Doc. DIFIR 36(64), LFCR65)30, Analisi della sicurezza / Addendum al Doc. DIFIR 37(64)
- (4) Probabilmente il "Nuclear Engineering Handbook" di H. Etherington, allora la bibbia degli ingegneri nucleari o il famoso "Perry" e cioè il "Chemical Engineering Handbook" di R. Perry
- (5) Esiste un documento d'epoca del 28-04-70, ma con correzioni successive, che potrebbe costituire l'elenco completo dei documenti prodotti nel corso della realizzazione del TAPIRO. "Bibliografia TAPIRO 28-04-1970" Elenco Rapporti Interni TAPIRO, Elenco Rapporti TAPIRO editi da vari Laboratori
- (6) RSV TAPIRO 52 "Rapporto Tecnico per il RSV TAPIRO "  
RSV TAPIRO 53 "Piano di Emergenza Interno"  
RSV TAPIRO 54 "Regolamento di Esercizio"  
RSV TAPIRO 55 "Manuale di Operazione"  
RSV TAPIRO 57 "Rapporto Finale di Sicurezza per il RSV TAPIRO - Vol.1 - Descrizione"  
RSV TAPIRO 57 "Rapporto Finale di Sicurezza per il RSV TAPIRO - Vol. 2 - Analisi della Sicurezza"  
RSV TAPIRO 59a "Programma Generale delle Prove con Combustibile Nucleare"  
RSV TAPIRO 59b "Specifiche Tecniche per l'Esecuzione delle Prove con Combustibile Nucleare"  
RSV TAPIRO 60 "Prove Combinate dell'Impianto Antecedenti il Caricamento del Combustibile Nucleare"

(7) Gli USA non vedevano di buon occhio una autonomia italiana nel nucleare perché contavano su una forte influenza scientifica e tecnica per mantenere una egemonia commerciale nella realizzazione delle centrali nucleari.

Ancora meno di buon occhio vedevano l'interesse italiano verso i reattori veloci in generale (e la partecipazione italiana al programma reattori veloci con la Francia in particolare).

Infatti, l'Atomic Energy Commission negli USA, nonostante varie e importanti realizzazioni sperimentali e una estesa ed importante attività di ricerca, non aveva mai scelto decisamente quella filiera.

(8) Le firme sulla carta del registratore del flusso neutronico sono:

Ugo Farinelli, Rinaldo Zona, Alvaro Palamidessi, Marcello Mazza, Tarantini (Teobaldo), Triglia Vincenzo, Di Modugno (Antonio), Cerioni Ferdinando, Gianfranco Franco, Luciana Bozzi, Massimo Martini, Bruno Musso, G.(Giancarlo) Rosi, G.(Giuseppe) Bianchi, Fiammetta Sebastianelli, Sergio Sarto, C.(Claudio) Accorona, Franco Pellicano.

Poi, a destra in basso, ci sono due possibilità: Marini (Leonardo), e segue firma illeggibile. Oppure: Marino Ballarin, dove la firma illeggibile sta per Ballarin.

(9) Lettera dal Gruppo di Lavoro TAPIRO alla Segreteria Generale (tramite Direzione del Centro) del 04-01-1968 Prot. 0855 Oggetto "Richiesta variazione di bilancio relativa all'articolo 1233"

## 2a PARTE

### 2. L'esercizio del reattore e l'attività sperimentale

#### 2.1. Premessa

Nel corso della lunga vita del TAPIRO si sono succeduti come Direttori Responsabili dell'Impianto diversi tecnici. Il primo è stato Claudio Accorona, che si è occupato dell'esercizio del reattore dalla fase preparatoria all'esercizio stesso, e dalla criticità, fino al 1982. L'ha sostituito Giancarlo Rosi fino a marzo del 2008. La responsabilità dell'impianto è poi passata a Orlando Fiorani fino al gennaio 2017.

Da quella data, a tutt'oggi, il Direttore Responsabile dell'Impianto è Luca Falconi. Questa seconda parte della storia è basata, oltre che su contributi personali, sulla documentazione predisposta periodicamente per il rinnovo della licenza di esercizio. Si tratta di documenti (9), perfezionati nel tempo, ricchi di dati statistici e informazioni riguardanti:

- il resoconto di eventuali eventi eccezionali;
- il funzionamento dell'impianto e le attività sperimentali svolte;
- lo stato di conservazione dell'impianto;
- le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria;
- il funzionamento del sistema di protezione fisica dell'impianto e la sorveglianza fisico/sanitaria del personale addetto;
- le relazioni sugli aspetti gestionali e amministrativi;
- le valutazioni aggiornate sul livello di sicurezza nucleare dell'impianto.

Un'attenzione particolare è sempre stata prestata alla radio-protezione dei lavoratori addetti all'impianto, per cui non si è mai verificato alcun episodio di superamento dei limiti ammessi.

Nel seguito sarà fornita una sintesi limitata delle sole attività sperimentali svolte e agli eventi eccezionali che si sono verificati, con qualche accenno allo stato dell'impianto, seguendo gli stessi periodi temporali cui si riferiscono i documenti di cui si è detto prima.

Va tuttavia ricordato che, nell'ambito della manutenzione straordinaria, l'impianto ha ricevuto nel corso del tempo importanti interventi, in particolare sul sistema di

strumentazione e controllo, per il necessario e inevitabile aggiornamento della componentistica.

## **2.2. Dall'aprile 1971 (criticità) al novembre 1977**

La massa di uranio necessaria affinché la reazione nucleare a catena si potesse auto-sostenere autonomamente (massa critica) fu determinata sperimentalmente, come si è riportato nella prima parte, nell'aprile del 1971. Durante questo esperimento, chiamato "esperimento critico", i dischi di combustibile del nocciolo mobile furono inseriti in una guaina di acciaio provvisoria secondo una sequenza di caricamento prestabilita. Questa sequenza fu predisposta prima dell'avvio del caricamento per garantire il raggiungimento della massa critica in condizioni di massima sicurezza. Al termine dell'esperimento i dischi furono trasportati in Belgio, dove furono incamiciati nella guaina di acciaio definitiva. Al loro ritorno al TAPIRO nell'ottobre del 1971, dopo le prime prove a reattore spento (prove a freddo) con il nocciolo nella configurazione finale, furono eseguite diverse criticità (cioè "accensioni") per testare la strumentazione di controllo dell'impianto, misurare la potenza effettiva del reattore, determinare gli effetti dovuti all'inserimento di campioni metallici all'interno delle zone d'irraggiamento, valutare l'importanza dei neutroni nel canale diametrale utilizzando una sorgente di californio (Fig. 27), realizzare una mappa del rateo di dose gamma e neutronica nella sala reattore a diversi livelli di potenza.

Dal 1973 iniziarono i primi irraggiamenti, non solo nell'ambito di collaborazioni internazionali, ma anche commissionati da sperimentatori dell'ENEA nel campo della medicina e della radiobiologia. Diversi irraggiamenti furono realizzati inserendo in uno dei canali biologici materiale organico come riso, polvere di patate, capelli, sangue umano e persino topi. Importante fu l'impegno richiesto per l'irraggiamento di alcuni campioni di elastomeri per la Nucleare Italiana Reattori Avanzati S.p.A. (NIRA S.p.A.) e la collaborazione con il CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives) per misurare la propagazione dei neutroni veloci in miscele di sodio e acciaio utilizzate come materiali schermanti dei reattori veloci come Super-Phénix. Quest'ultima attività fu iniziata nel 1976 e terminò nel quinquennio successivo.

### 2.3. Dal dicembre 1977 al novembre 1982

In questo periodo le attività d'irraggiamento furono interrotte a causa di un principio d'incendio verificatosi in sala controllo in orario non lavorativo, quindi a reattore spento, a causa di un corto circuito all'interno di un componente della consolle. Questo evento comportò un importante intervento di ripristino, con la sostituzione di alcuni apparati della consolle, il rifacimento e il cablaggio ex novo, con materiali ignifughi, di gran parte delle connessioni originali. Tale intervento fu completato con l'installazione di un nuovo e avanzato sistema di protezione dagli incendi con intervento di spegnimento automatico. Le attività sperimentali, sospese nel settembre del 1978 per i suddetti interventi, sono poi riprese all'inizio del 1980.

Di seguito sono elencate le più rilevanti.

- Misure di propagazione neutronica in mezzi misti Sodio-Acciaio.

Nel corso del quinquennio terminò la campagna di misure di propagazione neutronica in mezzi misti Sodio-Acciaio. In particolare furono eseguite delle esperienze d'irraggiamento su un modello in scala naturale riprodotto la parte centrale del reattore nucleare di tipo veloce PEC (Prova Elementi Combustibile) compresa assialmente fra il termine del "blanket" inferiore e la griglia di supporto (Fig. 28). Scopo dell'esperienza fu la valutazione degli effetti, sul danneggiamento della griglia, prodotti dallo spettro neutronico veloce.

- Esperienza "NEFERTITI"

Nell'ambito dell'accordo tra l'ENEA e il CEA, lo stesso della propagazione neutronica in mezzi misti Sodio-Acciaio, fu avviato e sviluppato un programma dedicato allo studio parametrico delle proprietà neutroniche di differenti configurazioni di "blanket" utilizzabili in reattori veloci di potenza. Questa esperienza, denominata "NEFERTITI" (NEutronica dei materiali FERTILI TAPIRO - Interfaccia), fu condotta in parallelo ad un programma sperimentale eseguito sul nocciolo del reattore MASURCA di Cadarache. L'avvio del programma sperimentale richiese l'approvazione da parte del Dipartimento di Sicurezza e Protezione (DISP) di un rapporto specifico sull'analisi di sicurezza con la proposta di una "normativa aggiunta" alle Prescrizioni Tecniche dell'impianto. La necessità di avere il maggior numero di neutroni veloci comportò, infatti, la modifica della configurazione del

riflettore esterno con la sostituzione di un settore di 60° in prossimità della colonna termica con un adattatore di spettro realizzato con barrette di uranio metallico, sodio e ferrite. Una volta ottenuta l'approvazione da parte della DISP e predisposte le finalità dettagliate dell'esperienza e le metodologie di esecuzione, furono avviati i primi irraggiamenti nel marzo del 1980 (Fig. 29), (Fig. 30). L'esperienza "NEFERTITI" richiese un impegno operativo consistente, oltre che la progettazione e realizzazione delle attrezzature sperimentali necessarie.

- Esperienze su neutroni ritardati

Ricercatori dell'ENEL e del Centro Studi Nucleari Enrico Fermi (CESNEF) utilizzarono il TAPIRO per la messa a punto di una tecnica di misura di flussi neutronici basata sul conteggio di neutroni ritardati emessi da piccoli campioni di fissile. Le esperienze furono eseguite introducendo un "rabbit" di misura nel canale radiale n°1.

- Irraggiamenti per il Laboratorio di Fisica e Tossicologia dell'ENEA (PAS-FIBI).

Per lo studio della radio-carcinogenesi ambientale a basse dosi indotta da neutroni di fissione, alcuni topi di diverse età furono sottoposti a irraggiamento neutronico nel canale verticale del reattore TAPIRO utilizzando degli speciali contenitori. In seguito furono compiute esperienze anche sul frazionamento della dose. Questi irraggiamenti furono eseguiti, come accennato, su richiesta e in collaborazione con alcuni ricercatori dell'ENEA del Laboratorio di Fisica e Tossicologia (PAS-FIBI) della Casaccia.

Oltre ai topi furono sottoposti a diversi irraggiamenti neutronici anche dei campioni di sangue umano periferico con lo scopo di determinare l'insorgenza di aberrazioni cromosomiche e stabilirne il rapporto dose-effetto. I risultati furono utilizzati per predisporre curve di calibrazione per il calcolo della dose assorbita in caso d'incidente.

#### **2.4. Dal dicembre 1982 all' ottobre 1985**

Il rinnovo della licenza di esercizio di questo quinquennio fu integrato, su richiesta della DISP, dalla revisione sismica dell'impianto. Il lavoro svolto da un gruppo di specialisti dell'AGIP, nell'ambito di un contratto di associazione ENEA-AGIP per i reattori veloci, richiese un'analisi attenta e sistematica del sito, delle strutture dell'impianto e della relativa

documentazione al fine di individuare tutti i possibili punti critici (10). Sulla base delle informazioni raccolte e dei sopralluoghi effettuati sull'impianto, in particolare nel locale sottopila, furono effettuati i calcoli e le valutazioni conclusive che fornirono un quadro estremamente positivo e del tutto tranquillizzante circa la solidità strutturale dell'impianto e dei suoi organi di controllo e sicurezza, tali da garantire la certezza del suo spegnimento anche a fronte di possibili eventi di intensità ben superiore al sisma di riferimento.

In questo periodo l'impianto TAPIRO fu quasi completamente impegnato per la campagna di misure di caratterizzazione iniziata nel 1980 e conclusasi nel 1986 sulla base di un accordo tra l'ENEA e il centro di ricerca belga SCK/CEN di Mol. Utilizzando diverse tecniche furono misurati i flussi e gli spettri neutronici in diversi canali di irraggiamento valutando gli effetti perturbativi introdotti dalla posizione delle barre di controllo. Questa campagna di caratterizzazione dimostrò che il TAPIRO è in grado di fornire flussi neutronici con spettri energetici estremamente variabili a partire da quello prossimo allo spettro di fissione che si ha al centro del nocciolo. Tale caratteristica, unitamente alla buona simmetria sferica della distribuzione spaziale del flusso, rende il TAPIRO adatto a notevoli applicazioni metrologiche e sperimentali.

## **2.5. Dal novembre 1985 al marzo 1994**

In questo periodo c'è da segnalare il completamento dell'ampliamento del corpo di fabbrica adiacente all'edificio originale, che ha consentito una migliore sistemazione logistica del personale di esercizio, di facilitare le attività di laboratorio per le manutenzioni e di avere un magazzino per i pezzi di scorta. In una foto del 1985 (Fig. 31) il direttore responsabile Giancarlo Rosi e il supervisore Antonio Perrone si trovano in sala controllo mentre pianificano le attività della giornata.

### **- Esperienza "NEFERTITI"**

In questo periodo sono terminate le attività di caratterizzazione del reattore e del programma NEFERTITI iniziate nel quinquennio precedente.

Il programma di esperienze "NEFERTITI", avviato nel 1980, fu terminato con il trasferimento presso il Centro di Cadarache del CEA del materiale fissile utilizzato nelle

diverse installazioni previste dalle fasi sperimentali del programma. Al termine di questa esperienza gli apparati contenenti miscele sodio-acciaio inseriti nella colonna termica furono smantellati e fu ripristinata la struttura in grafite che insieme allo schermo biologico in calcestruzzo furono utilizzati in relazione alle diverse esigenze connesse alle successive, molteplici attività sperimentali.

- Caratterizzazione del reattore.

Le complesse attività di caratterizzazione, terminate nel 1986, interessarono varie componenti strutturali del reattore (nocciolo, riflettore, canali di irraggiamento), con l'ausilio di rivelatori ad attivazione e di camere a fissione. I dati conclusivi di questo programma sono ancora oggi oggetto di studio poiché consentono di avere gli elementi conoscitivi circa le proprietà neutroniche del reattore (mappe di flusso, indici spettrali, ecc.), necessari a ottimizzarne l'utilizzo sperimentale. Al termine di tale attività tutte le modifiche nella geometria e nel riempimento dei canali d'irraggiamento apportate durante il programma di caratterizzazione furono eliminate e furono ripristinate le condizioni originali.

- Irraggiamenti di materiali biologici

Durante l'intero quinquennio sono state condotte le attività proposte dai ricercatori del Dipartimento Ambiente dell'ENEA per lo studio degli effetti su materiali biologici e su animali da laboratorio di flussi calibrati di neutroni (Fig. 32).

In particolare furono eseguite le campagne sperimentali per:

lo studio degli effetti tardivi sugli animali da esperimento indotti dalla somministrazione di basse dosi neutroniche multifrazionate o protrate;

lo studio della suscettibilità e resistenza alla induzione di tumori da parte di neutroni di fissione in due linee selezionate di topi;

gli studi sperimentali in vitro di carcinogenesi da radiazioni ionizzanti ad alto LET (Linear Energy Transfer) a livello cellulare, utilizzando sospensioni di cellule epiteliali murine ed umane.

Fu anche terminato un programma di ricerca per l'irraggiamento di cellule e linfociti umani sia per ricerche di base nel campo della radiobiologia di particelle ionizzanti ad alto LET che applicative nel campo della radioprotezione con una convenzione tra ENEA e l'Istituto

Nazionale di Fisica Nucleare INFN su nuove metodologie di dosimetria biologica, e delle radioterapie, con una convenzione con il centro di ricerca oncologico di Aviano.

- Irraggiamento di componenti all'Arseniuro di Gallio (GaAs).

Nell'ambito di una collaborazione tra l'INFN e l'ENEA furono effettuati diversi irraggiamenti per lo studio degli effetti del danneggiamento neutronico dei componenti elettronici all'Arseniuro di Gallio dell'esperimento ELGAAS. Al termine degli irraggiamenti effettuati nel canale tangenziale del TAPIRO i campioni in GaAs furono estratti e sottoposti ad alcuni test elettronici di funzionamento e di rilevamento delle eventuali variazioni delle caratteristiche originali.

## **2.6. Dall'aprile 1994 al maggio 1997**

In questo intervallo temporale sono proseguite le attività riguardanti l'irraggiamento di campioni biologici per conto dei ricercatori del Dipartimento Ambiente (AMB) dell'ENEA e quelle sui componenti in GaAs in collaborazione con i ricercatori dell'INFN. Di seguito sono riportate le altre attività di rilievo eseguite nel quinquennio che va dal 1994 al 1997.

- Progettazione calorimetro ECAL.

Quest'attività fu di aiuto alla progettazione del calorimetro elettromagnetico ECAL, del CMS (Compact Muon Solenoid) nell'LHC (Large Hadron Collider) del CERN.

L'attività interessò:

- l'irraggiamento di monocristalli scintillatori di tungstato di piombo per verificarne il danneggiamento e mutamento delle caratteristiche;

- l'irraggiamento di APD (Avalanche Photo Diode) al fine di verificare il danno indotto e le variazioni di caratteristiche ottiche ed elettriche;

- l'irraggiamento di lamine ottiche con rivestimento di ossido di Ittrio per uno studio di "coating" ai fini di un'attivazione dell'accoppiamento ottico con gli APD.

- Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

Fu avviata un'attività che portò alla trasformazione della colonna termica del TAPIRO per la realizzazione di un fascio collimato di neutroni epitermici. Lo scopo della terapia BNCT è

di distruggere i tessuti tumorali tramite la cattura neutronica del Boro presente in un composto somministrato a un paziente malato. La cattura del neutrone da parte del Boro (in particolare dell'isotopo  $^{10}\text{B}$ ) genera particelle cariche in grado di uccidere la cellula che attraversa. L'utilizzo di un composto contenente Boro, in grado di entrare selettivamente nelle cellule malate, e l'irraggiamento con un fascio neutronico epitermico sono i due elementi su cui si basa la BNCT per il trattamento di tumori cerebrali non superficiali (glioblastomi).

L'attività, condotta in collaborazione con l'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna e con il Politecnico di Milano, fu suddivisa nelle seguenti fasi:

- a) progettazione neutronica e realizzazione di una colonna epitermica, previa modifica del riflettore esterno già effettuata durante l'esperienza NEFERTITI;
- b) caratterizzazione neutronica della colonna epitermica stessa e sviluppo della dosimetria su head phantoms da trattare con BNCT;
- c) irraggiamenti su animali di grossa taglia, ai fini di un successivo, possibile trasferimento all'uomo della tecnica BNCT.

- Caratterizzazione di componenti al silicio.

Quest'attività ebbe come scopo la caratterizzazione sotto irraggiamento di componenti al silicio installati su attrezzature elettroniche aerospaziali.

- Efficienza contatori a  $^{16}\text{N}$

Nell'ambito del progetto SILENA fu avviata una campagna d'irraggiamenti per lo studio online delle caratteristiche e dell'efficienza di contatori contenenti  $^{16}\text{N}$  da utilizzare in centrali nucleari dell'Est Europa.

- Nota sullo stato dell'impianto

Per lo svolgimento delle attività di questo periodo, e in particolare per la BNCT, il settore di  $60^\circ$  del riflettore esterno fu sostituito con un cestello avente la stessa forma e dimensioni geometriche, costituito da una struttura in alluminio e riempito con circa 30 kg di allumina. Per compensare la perdita di neutroni riflessi verso il nocciolo dovuta alla sostituzione del settore del riflettore esterno fu inserita la pastiglia di calibrazione, che ha la stessa composizione del nocciolo, nella cavità di irraggiamento. L'operazione non comportò

particolari problemi operativi né dal punto di vista meccanico né per il successivo approccio alla criticità. Le operazioni di modifica del riflettore e d'inserimento della pastiglia di calibrazione furono precedute dalla valutazione degli aspetti di sicurezza nucleare con l'ausilio di alcune simulazioni effettuate con un codice di calcolo Monte Carlo. I risultati delle simulazioni ottennero un'ottima conferma sperimentale con le valutazioni fatte in seguito allo spostamento in banco delle due barre di calibrazione.

Come nel quinquennio precedente la colonna termica ospitò, secondo le diverse esigenze sperimentali, alternativamente uno schermo biologico di calcestruzzo e la struttura in grafite.

## **2.7. Dal giugno 1997 all'ottobre 2000**

Di particolare importanza per la conduzione dell'impianto e le successive attività sperimentali fu la rivalutazione della potenza del TAPIRO che portò ad avere un sostanziale aumento del flusso di neutroni disponibile. Poco dopo la prima criticità del TAPIRO, avvenuta nell'aprile del 1971, fu eseguita, con le tecniche teoriche sperimentali e le metodologie di calcolo dell'epoca, una calibrazione della potenza di funzionamento. In questo quinquennio fu eseguita una caratterizzazione, condotta con tecniche teorico-sperimentali molto raffinate e aggiornate che fece emergere una differenza non trascurabile tra l'indicazione della strumentazione di controllo del reattore e il suo effettivo livello di potenza. Quest'ultimo fu dell'ordine di  $3.6\div 3.8$  kW e quindi sensibilmente inferiore ai 5 kW originariamente valutati. Questa rivalutazione permise di avere, alla potenza di 5 kW, una quantità di neutroni disponibili maggiore rispetto al passato. La sottostima del reale flusso di neutroni disponibile, con cui furono inconsapevolmente dimensionati gli irraggiamenti fatti fino allora, non ne rappresentò un limite perché nelle varie esperienze non era stato mai richiesto un livello di flusso così alto. Rischiava invece di essere decisivo per la fattibilità della BNCT, dove invece era richiesto un flusso di neutroni più alto di quello disponibile con la vecchia valutazione della potenza. I risultati della rivalutazione furono comunicati all'Autorità di Controllo insieme alla richiesta di modifica di alcune soglie riguardanti il massimo flusso neutronico raggiungibile (11). L'iter autorizzativo terminò positivamente, dando il via all'attuazione delle modifiche necessarie affinché si potesse raggiungere il nuovo valore della potenza di esercizio.

La Fig. 33 mostra la sala reattore in questo periodo, si può osservare la disposizione di alcune attrezzature sperimentali in prossimità del canale radiale 2.

Le attività di ricerca più rilevanti sono state:

- Attività di supporto all'esperimento CMS.

In questo periodo fu assicurato il supporto necessario alla progettazione iniziata nel quinquennio precedente del calorimetro elettromagnetico ECAL e dell'apparato TRACKER per l'esperimento CMS (Compact Muon Solenoid) del LHC al CERN di Ginevra.

Per l'apparato TRACKER furono portate a termine le seguenti attività:

l'irraggiamento di lamine ottiche con rivestimento di ossido di Itrio per lo studio del "coating" per l'accoppiamento con gli APD;

l'irraggiamento di rivelatori al silicio;

l'irraggiamento di componentistica elettronica con successiva verifica del danno indotto e della variazione delle caratteristiche originali.

- Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

Nell'ambito del progetto interuniversitario cofinanziato dal MURST dal titolo "Studi preparatori alla realizzazione in Italia della radioterapia per cattura neutronica da parte del boro (BNCT) nei gliomi maligni" fu attivato un accordo tra le Università di Pisa, Milano, Bologna, Genova, Torino, Perugia e Roma Tor Vergata. Mediante quest'accordo fu progettata, realizzata e assemblata all'interno della colonna termica del TAPIRO una struttura per l'utilizzo dei neutroni epitermici chiamata "colonna epitermica". La facility epitermica era composta, nella parte più interna, da una struttura moderante in fluoruro di alluminio, circondata da un riflettore in nichel (15 cm) e da uno schermo biologico ad alta densità. Nella parte più esterna era presente un collimatore di piombo che terminava con un vano d'irraggiamento. La colonna epitermica fu sottoposta a una fase di caratterizzazione neutronica e dosimetrica propedeutica all'avvio della prevista campagna sperimentale per la BNCT. Per la valutazione della fattibilità e delle norme operative per un trasferimento della tecnica BNCT all'uomo furono previsti irraggiamenti su manichini antropomorfi e su animali di media taglia. Nelle prime fasi del progetto furono previsti degli

irraggiamenti con un fascio di neutroni termici su ratti portatori di glioma murino C6, preventivamente trattati con BPA (Borofenilalanina). Per questo motivo alla progettazione e realizzazione della colonna epitermica fu intrapresa, in parallelo, l'allestimento di una facility in grado di fornire neutroni termici. Questa fu realizzata con blocchi di grafite in dotazione dell'impianto e caratterizzata dal punto di vista neutronico e dosimetrico in collaborazione con i ricercatori dell'Università di Milano e dell'INFN.

Il completamento della fase di caratterizzazione del fascio di neutroni consentì l'avvio di una campagna d'irraggiamenti su cavie che fu condotta da un'equipe biomedica e neurochirurgica dell'Università di Tor Vergata e dell'Ospedale S. Eugenio di Roma.

- Nota sullo stato dell'impianto.

Nel riflettore esterno fu mantenuta la struttura in alluminio contenente allumina al posto del settore di rame di 60° originale mentre nella colonna termica furono inseriti, alternativamente, lo schermo biologico di calcestruzzo, l'apparato sperimentale di grafite, la facility termica e quella epitermica per la BNCT.

## **2.8. Dal novembre 2000 al settembre 2007**

In questo periodo l'impianto fu principalmente impegnato nella realizzazione delle attività sperimentali relative alla BCNT.

- Nell'ambito dell'attività di ricerca relative alla BNCT, di cui si è detto, furono progettate e realizzate alcune facility, brevemente descritte di seguito, in grado di fornire il fascio di neutroni idoneo, per intensità e spettro energetico, a realizzare le condizioni sperimentali ottimali pur con il bassissimo livello di potenza di esercizio del reattore.

- Colonna epitermica (EPIX)

Dopo la sua installazione effettuata nel quinquennio precedente, la colonna epitermica EPIX fu caratterizzata e utilizzata per eseguire irraggiamenti su piccoli animali da laboratorio e su manichini antropomorfi. Quest'attività fu propedeutica alla progettazione e costruzione della successiva facility in grado di fornire un fascio neutronico epitermico atto alla sperimentazione clinica della tecnica BNCT.

#### - Nuova colonna epitermica (EPIMED)

Sulla base dei risultati ottenuti dalle attività su EPIX, fu progettata e realizzata una nuova colonna epitermica (EPIMED) con caratteristiche tali da rendere possibile l'eventuale posizionamento di un paziente su barella direttamente all'uscita del fascio neutronico dal collimatore (Fig. 34), (Fig. 35). Quest'attrezzatura era costituita da un moderatore di fluoruro di alluminio (compattato ed inserito in contenitori modulari di diverso spessore), circondato da un riflettore di nickel, da un collimatore finale a settori costituito da circa 10 tonnellate di piombo puro terminante con una lastra schermante in polietilene litiato. Per la caratterizzazione del fascio neutronico fu allestito intorno alla bocca di uscita del fascio dal collimatore un bunker schermante costituito da blocchi di calcestruzzo e spessori di polietilene borato e di ferro al fine di operare nel rispetto dei vincoli di radioprotezione previsti. Fu tuttavia necessario predisporre una recinzione dell'area circostante, esterna all'edificio, cui si poteva accedere solo a reattore spento e in condizioni controllate.

Dopo un complesso iter autorizzativo, nel mese di giugno 2007, furono avviate le attività di caratterizzazione del nuovo fascio di neutroni epitermici nel rispetto delle condizioni operative concordate.

#### - Nuova colonna termica (HYTOR)

Una prima fase di sperimentazione animale delle applicazioni BNCT-PDT (Photodynamic Therapy), per il trattamento del melanoma cutaneo, fu condotta dal Dipartimento di Biologia dell'Università di Padova e dai Laboratori Nazionali di Legnano (LNL) dell'INFN nella colonna termica originale del reattore (quella in grafite). In seguito fu realizzata, installata e caratterizzata una nuova colonna termica modificata sulla quale sono poi proseguite tali ricerche.

La nuova facility chiamata HYTOR (HYbrid Thermal spectrum sHifter TapirO Reactor), progettata e realizzata dall'INFN in collaborazione con la Direzione dell'impianto, è dotata di cuscinetti di rotolamento che ne consente un rapido inserimento ed estrazione nel vano "colonna termica" (Fig. 36). La facility HYTHOR è costituita da blocchi di grafite e di teflon che circondano un vano sperimentale di circa 3.5 litri (schermato da uno spessore di bismuto), all'interno del quale, alla potenza di 5 kW, è disponibile un flusso di neutroni termici di circa  $4 \times 10^9$  n/cm<sup>2</sup>/s caratterizzato da una minima componente di neutroni veloci

e gamma oltre che da una buona isotropia volumetrica. Tale facility fu utilizzata dai ricercatori dei LNL (Laboratori Nazionali di Legnaro) dell'INFN anche per la messa a punto di un sofisticato ed innovativo apparato micro-dosimetrico in grado di discriminare i vari contributi di dose in un campo misto di radiazioni.

- Prove su camere di precisione.

Fu avviata dai ricercatori dell'Università di Roma 3 e della Calabria una ricerca sulla resistenza alla radiazione di neutroni e sul tracciamento in ambiente ad alto fondo neutroni-gamma di una camera di precisione dello spettrometro per muoni dell'esperimento ATLAS presso l'acceleratore LHC del CERN di Ginevra.

Le prove consentirono di dimostrare l'effettiva resistenza del rivelatore fino a quattro volte la dose integrata in 10 anni di attività alla luminosità nominale dell'acceleratore. Fu anche osservato che non c'era nessuna apprezzabile diminuzione dell'efficienza del rivelatore nelle condizioni di fondo neutronico e gamma simile a quello che avrebbe incontrato durante la normale attività dell'acceleratore. Gli irraggiamenti furono eseguiti nel vano d'irraggiamento riadattato della colonna epitermica EPIX.

- Irraggiamento su semiconduttori (GaAs e InAs)

Con l'obiettivo di ottimizzare i processi per il trattamento dei materiali semiconduttori realizzati in GaAs e InAs con fasci neutronici furono effettuate presso il TAPIRO diverse campagne sperimentali. I campioni in GaAs e InAs furono irraggiati con il flusso neutronico veloce disponibile nel canale tangenziale. Quest'attività fu condotta nell'ambito di un progetto diretto dai ricercatori dell'Università di Padova e dedicato allo sviluppo di una sorgente di radiazione Terahertz (THz) basata su nuovi materiali e tecnologie laser innovative a stato solido.

- Formazione

Durante questo periodo proseguì la collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università Sapienza di Roma e altre Università Italiane, in particolare con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano, per attività di carattere prevalentemente formativo quali tesi e tirocini.

- Nota sullo stato dell'impianto

In questo quinquennio fu rimosso il cestello di alluminio contenente allumina installato nel riflettore esterno lasciando il settore di 60° orientato verso la colonna termica completamente vuoto. La rimozione dell'allumina comportò la necessità di compensare il relativo deficit di reattività mediante il riempimento del canale diametrale con pellets di uranio metallico, anch'esse arricchite al 93.5%, già utilizzate durante la caratterizzazione neutronica dell'impianto effettuata nel periodo 1982-1985. La pastiglia di calibrazione rimase posizionata nella cavità di irraggiamento dove era stata inserita per bilanciare il deficit di reattività conseguente alla sostituzione del settore in rame del riflettore esterno con il cestello contenente allumina.

### **2.9. Incontro dei “Tapiri” del 04-10-2004**

Il 4 ottobre del 2004 quasi tutti quelli che avevano partecipato alla progettazione e costruzione del TAPIRO e quelli che avevano svolto la funzione di Responsabile dell'Impianto s'incontrarono presso il Centro di ricerche della Casaccia cordialmente accolti dai colleghi in servizio. Alcuni momenti dell'incontro furono immortalati nelle immagini riportate in Fig. 37 e Fig. 38.

### **2.10. Dall'ottobre 2007 al maggio 2012**

In questo quinquennio ci fu un periodo d'inattività dal 14 marzo 2008 al 7 gennaio del 2009 per l'arresto dell'impianto dovuto a motivi gestionali e amministrativi. Al termine di questo periodo furono ripristinate le prescrizioni minime relative al personale di conduzione dell'impianto e fu possibile far ripartire le attività sperimentali del TAPIRO. Fino al 5 marzo 2010 il TAPIRO fu in larga misura utilizzato a supporto delle attività sperimentali condotte dalla comunità scientifica nazionale impegnata nei programmi per lo sviluppo della tecnica BNCT per la sperimentazione clinica su alcune patologie tumorali. A questo scopo furono utilizzate le attrezzature EPIMED e HYTOR descritte nel precedente periodo (giugno 1997 – ottobre 2000).

- Smantellamento dell'esperienza Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

Il 5 marzo 2010 iniziarono i lavori per lo smantellamento del bunker della facility sperimentale EPIMED realizzato nella sala reattore dopo i relativi controlli radiometrici che consentirono il trasferimento dei relativi componenti all'esterno, in zona sorvegliata.

- Nuova installazione della facility HYTHOR

Il 19 luglio 2010 fu nuovamente installata nel vano della colonna termica la facility HYTHOR e fu ripristinato il portellone originario. La facility HYTHOR fu utilizzata, come già accennato nel precedente capitolo (giugno 1997 – ottobre 2000), dai ricercatori dei LNL dell'INFN per completare la sperimentazione del nuovo sistema micro-dosimetrico per la misura di differenti contributi di dose in un campo misto di radiazioni.

- Formazione

In questo quinquennio furono eseguiti presso l'impianto stages formativi, programmi di addestramento sull'impianto e tesi di laurea in collaborazione con alcuni docenti del corso di Ingegneria Nucleare dell'Università Sapienza di Roma.

- Nota sullo stato dell'impianto

Al termine di questo periodo rimasero posizionati nella cavità di irraggiamento la pastiglia di calibrazione e nel canale diametrale le pellets di uranio metallico arricchito al 93.5%. La colonna termica fu oggetto, come si è accennato, di alcune variazioni di configurazione che terminarono con l'installazione della colonna HYTOR.

## **2.11. Dal giugno 2012 al luglio 2017**

In questo periodo il TAPIRO fu soggetto ad alcune interruzioni funzionali che ne hanno condizionato la continuità operativa.

- La prima si rese necessaria per ripristinare, con un idoneo intervento di manutenzione, la corretta funzionalità operativa del circuito primario. Lo smontaggio e il ripristino funzionale dei sistemi filtranti a monte e a valle del circolatore Rateau consentì il ripristino dei normali parametri operativi del circuito di refrigerazione ad elio. Si trattò di un intervento di un certo impegno temporale e procedurale, per le inevitabili implicazioni di ordine radiologico e

dosimetrico connesse, che consentì il perfetto ripristino della corretta operabilità dell'impianto peraltro verificata, al termine dell'intervento, a diversi livelli di potenza e per diverse ore di funzionamento.

- Dopo tale intervento si decise di iniziare il ripristino della configurazione originaria dell'impianto con la rimozione della pastiglia di calibrazione dalla cavità d'irraggiamento e delle pellets dal canale diametrale, oltre che con il ripristino del settore di rame nel riflettore esterno.

La rimozione della pastiglia di calibrazione, in particolare, ha richiesto la predisposizione di una procedura ad hoc, che ha comportato la progettazione e realizzazione di un dispositivo di estrazione della pastiglia stessa in condizioni radiologiche controllate e accettabili (12). Per effettuare questo intervento il reattore fu messo temporaneamente in condizione di arresto.

Nonostante il notevole ridimensionamento del periodo di operatività dell'impianto fu comunque svolto un intenso programma sperimentale.

La foto di Fig. 39 ritrae il gruppo di esercizio del 2016 nella sala controllo del TAPIRO.

- Irraggiamento di un micro-motore ceramico

Questo lavoro fu realizzato su richiesta del responsabile dell'unità UTFUS dell'ENEA per l'irraggiamento neutronico di un micro-motore ceramico. Il massimo flusso integrato richiesto era di almeno  $2.3 \cdot 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> con uno step intermedio di  $1.3 \cdot 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>. La massima fluenza richiesta fu raggiunta con 18 giorni d'irraggiamento per un totale di circa 85 ore alla potenza di circa 4 kW. Lo scopo di questa esperienza fu quello di valutare la resistenza al danneggiamento neutronico di un micro-motore piezo-ceramico costituito da una lega alluminio-manganese-magnesio da montare sulla prima parete del vessel dell'International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) (Fig. 40). I risultati furono pubblicati sulla rivista "Fusion Engineering and Design" nel 2015.

- Irraggiamento di acciaio (15-15 Ti) con diversi rivestimenti

Questa era una delle attività previste nella partecipazione all'Accordo di Programma (AdP) del Ministero dello Sviluppo Economico del 2013. L'esperienza è consistita nell'irraggiamento nel canale radiale 1 di tre campioni di acciaio tipo "15-15 Ti" con tre diversi tipi di rivestimento (Fig. 41). I tre supporti furono irraggiati in contemporanea con il

micro-motore ceramico di cui si è detto. Lo scopo di questo lavoro è stato quello di valutare la resistenza dei rivestimenti dell'acciaio a un elevato flusso neutronico integrato per un loro utilizzo nei reattori Lead-cooled Fast Reactor (LFR) raffreddati a piombo.

- Irraggiamento di fotodiodi Hamamatsu

Su richiesta della sezione di Bologna dell'Istituto di Fisica Nucleare (INFN) furono irraggiati nel canale radiale 2 due fototubi Hamamatsu e due segmenti di fibra ottica in quarzo (Fig. 42). La quantità di neutroni richiesti fu quella corrispondente alla fluenza neutronica di  $5 \cdot 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>.

- Irraggiamento di Avalanche photodiode (APD)

Alcune decine di APD (Fig. 43) furono irraggiati all'interno del canale radiale 1 del TAPIRO con lo scopo di valutare la resistenza al danneggiamento neutronico di una tipologia di fotodiodi da montare come foto-sensori nel calorimetro elettromagnetico ECAL dell'esperimento "Compact Muon Solenoid" del Large Hadron Collider del CERN. Questo lavoro fu commissionato dai ricercatori della sezione di Roma dell'Istituto di Fisica Nucleare (INFN). I risultati di questa esperienza sono stati pubblicati su una importante rivista specializzata.

- Irraggiamento di alimentatori APOLLO

Lo scopo di questo lavoro fu di valutare la resistenza al danneggiamento neutronico degli alimentatori di potenza per alti livelli di radiazione (APOLLO) da montare sull'esperienza ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) del LHC del CERN. Tre schede elettroniche furono irraggiate all'interno del canale radiale 1 per circa 23 ore (5 giorni lavorativi) alla potenza di 4 kW. Questa sperimentazione fu richiesta da parte dell'Unità Tecnica "Tecnologie dei Materiali" (UTMAT) dell'ENEA.

- Irraggiamento di rivelatori a diamante

Questo lavoro fu realizzato su richiesta di alcuni sperimentatori della sezione dell'INFN di Genova per delle prove di funzionamento di alcuni rivelatori di neutroni a diamante. I rivelatori di neutroni di nuova concezione, installati all'interno del canale tangenziale, furono testati per 4 giorni a diversi livelli di potenza con lo scopo di valutarne l'efficienza. I

risultati di questa esperienza sono stati presentati nell'aprile del 2015 al convegno "4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications" tenutosi a Lisbona.

- Caratterizzazione della colonna termica per esperienza per reattori di IV generazione  
Anche quest'attività fu realizzata nell'ambito della partecipazione all'Accordo di Programma del Ministero dello Sviluppo Economico del 2013. Lo scopo fu di valutare il flusso neutronico all'interno del vano vuoto della colonna termica per definire una successiva fase sperimentale per lo studio della diffusione dei neutroni in piombo. L'esperienza di caratterizzazione fu realizzata con foglioline d'oro e camere a fissione disposte su una traversa all'interno della colonna termica dopo la rimozione della facility HYTOR.

- Irraggiamento di Self-Powered Neutron Detector (SPND)

Lo scopo di questo lavoro fu di valutare la possibilità di utilizzare dei rivelatori self-powered commerciali, normalmente utilizzati nei reattori termici, per la misura di neutroni veloci prodotti dal Tritium Breeding Module di ITER. In questa esperienza, richiesta dell'Unità Tecnica Fusione (UTFUS) dell'ENEA, furono provati all'interno del canale tangenziale alcuni rivelatori "self-powered". Le prove furono eseguite in un giorno a diversi livelli di potenza.

Nel 2012 il TAPIRO entrò a far parte del Mediterranean Research Reactor Network (MRRN) promosso dalla IAEA per incrementare l'utilizzo dei reattori di ricerca presenti nell'area del mediterraneo.

Nel 2016 l'impianto TAPIRO fu inserito nel programma di tirocinio sui neutroni organizzato dall'"Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti" (INMRI). In questo periodo è anche proseguita la collaborazione con l'Università Sapienza di Roma incentrata sul Probabilistic Safety Assessment (PSA)

2-11 Dall'ottobre 2017 ai giorni nostri.

Come accennato al precedente punto 2-10, con la rimozione della pastiglia di calibrazione dalla cavità d'irraggiamento del nocciolo mobile e delle pellets dal canale diametrale, oltre

che con la riconfigurazione del riflettore esterno con il riempimento del settore di rame rimovibile, terminarono le operazioni di ripristino della situazione originaria dell'impianto, ad eccezione del riempimento della colonna termica in cui è rimasta la facility HYTOR.

Con questa configurazione sono state eseguite le prime prove di criticità dapprima a bassa potenza (minore di 50 W) e successivamente a potenze progressivamente più alte fino a 4 kW. Durante questa fase sono state spostate le barre di calibrazione per compensare la mancanza di reattività della nuova configurazione e sono state rifatte le misure radiometriche sia nell'area reattore sia all'esterno dell'edificio. Questa fase è terminata nel mese di febbraio del 2020 rendendo l'impianto pronto a soddisfare le diverse richieste d'irraggiamento che intanto si sono accumulate.

La maggior parte delle attività d'irraggiamento previste per il 2020 riguardano il danneggiamento indotto da neutroni veloci e la valutazione dei suoi effetti macroscopici.

- Irraggiamento di componenti per l'esperimento LUCID

Questa esperienza riguarda l'irraggiamento neutronico di componenti, quali cavi, connettori e fibre ottiche, da utilizzare nell'esperimento LUCID (LUMinosity Cerenkov Integrating Detector) del LHC al CERN. Lo scopo è di valutare il deterioramento delle caratteristiche elettriche e ottiche di questi componenti che nell'esperimento LUCID sono sottoposti a particelle secondarie dell'acceleratore LHC.

È proposto da un gruppo di ricercatori dell'INFN della sezione di Bologna.

- Irraggiamento di lastre di grafene

Quest'attività consiste nell'irraggiamento di cinque lastre di grafene in cui s'intende valutare il numero di difetti introdotti sulla struttura bidimensionale. L'attività è prevista all'interno di una collaborazione con l'Università di Milano.

- Irraggiamento di un campione di KAPTON

Campioni di KAPTON saranno irraggiati all'interno del canale radiale 1 per valutare la variazione delle loro proprietà di riflessione ottica. Lo scopo è di quantificare la riduzione

delle caratteristiche ottiche delle vele solari da realizzare in KAPTON per la propulsione di satelliti.

- Dal 2019 l'impianto TAPIRO è stato inserito nel gruppo di facility che possono essere utilizzate dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) per l'irraggiamento con neutroni veloci di alcuni tipi di componenti da installare in dispositivi da utilizzare nelle missioni spaziali.

- Le caratteristiche neutroniche del TAPIRO sono risultate interessanti per l'irraggiamento di dispositivi e componenti da utilizzare in ITER. Su questo versante si sta attualmente valutando la fattibilità di questi irraggiamenti anche tenendo conto di quanto è stato già fatto per i colleghi di UTFUS nel 2013 con il motorino ceramico.

A queste attività, il cui scopo è di indurre un danneggiamento da neutroni veloci, bisogna aggiungere quella di caratterizzazione dei canali d'irraggiamento più utilizzati (canale radiale 1, canale radiale 2, tangenziale, colonna termica) con camere a fissione e foglioline metalliche con la tecnica multi-foil activation.

Infine, è in corso una collaborazione con alcuni ricercatori del centro di ricerche Cadarache del CEA per lo svolgimento in TAPIRO del programma AOSTA (Activation of Osmose Samples in TAPIRO), concepito in seno ad un working group della NEA e finalizzato allo studio dei dati nucleari di base di alcuni attinidi minori.

L'attuale gruppo di esercizio dell'impianto TAPIRO è composto da Luca Falconi (direttore responsabile), Alfonso Santagata (direttore tecnico e supervisore), Matteo Cesaroni (supervisore), Barbara Bianchi (operatore), Pierpaolo Ricci (operatore) e Antonino Ratto (tirocinante supervisore). Nella foto di Fig. 44 i quattro patentati compaiono con la mascherina chirurgica per il rispetto delle restrizioni imposte dall'emergenza sanitaria causata dalla diffusione dell'infezione al SARS-CoV-2 (Covid 19).

In conseguenza della pandemia di Covid 19 dal 9 marzo 2020, anche l'attività del TAPIRO è stata sospesa .....

=====

## 2.12. NOTE (2a Parte)

(9) Elenco documenti relativi al rinnovo licenza:

- Registri delle operazioni
  - (CT-WHD 0003) Documentazione tecnica relativa allo stato di conservazione e funzionamento del reattore R.S.V. TAPIRO – Periodo: dicembre 1977 – novembre 1982
  - (TLE TAPIRO 94/0) Rapporto sullo stato di conservazione e funzionamento dell'impianto R.S.V. TAPIRO – Periodo: novembre 1985 – marzo 1994
  - (TLE TAPIRO 97/0) Rapporto sullo stato di conservazione e funzionamento dell'impianto R.S.V. TAPIRO – Periodo: aprile 1994 – maggio 1997
  - (TLE TAPIRO 00/01) Rapporto sullo stato di conservazione e funzionamento dell'impianto R.S.V. TAPIRO – Periodo: giugno 1997 – ottobre 2000
  - (TLE TAPIRO 07/02) Rapporto sullo stato di conservazione e funzionamento dell'impianto R.S.V. TAPIRO – Periodo: novembre 2000 - settembre 2007
  - (TAPIRO-SC-012) Rapporto sullo stato di conservazione e funzionamento dell'impianto R.S.V. TAPIRO – Periodo: ottobre 2007 - maggio 2012
  - (TAPIRO-SC-2017) Rapporto sullo stato di conservazione e funzionamento dell'impianto R.S.V. TAPIRO – Periodo: giugno 2012 - luglio 2017
- (10) G. Bruzzi, S. Clementel, R. Galvagni, C. Zoccatelli - “Verifica sismica reattore sperimentale veloce TAPIRO” – AGIP dicembre 1984
- (11) (TLE TAPIRO 98/8- 005) "Results of Monte Carlo neutronic calculations on TAPIRO core for the reevaluation of the operating reactor power"
- (12) " Programma della sorveglianza fisica, ambientale e personale della radio-protezione durante le operazioni di rimozione manuale della pastiglia di calibrazione dal nocciolo dell'impianto nucleare RSV TAPIRO del C. R. Enea della Casaccia" (XXXVII Congresso Nazionale di Radioprotezione – Bergamo 17/19 ottobre 2018)

### 3. Il futuro del TAPIRO

Il programma italiano sui reattori veloci FBR (Fast Breeder Reactor) avviato agli inizi degli anni '60 era basato sul ciclo uranio-torio e fu chiamato RAPido Torio Uranio Sodio (RAPTUS). In questo ambizioso programma era previsto l'utilizzo di un reattore veloce di piccole dimensioni e di potenza trascurabile. Questo reattore sarebbe servito alla taratura di rivelatori, per la messa a punto di tecniche di cinetica, per piccole esperienze esponenziali veloci, ecc... Su queste premesse nacque il progetto che portò alla costruzione dell'R.S.V. TAPIRO. Il progetto RAPTUS non ebbe vita facile e alla fine fu interrotto. Il TAPIRO, invece, fu realizzato e nei suoi primi anni di vita fu effettivamente utilizzato per lo studio di alcuni aspetti legati ai reattori veloci. Il basso consumo del combustibile lo ha reso indipendente dai problemi legati al processo di produzione e all'approvvigionamento di combustibile nucleare altamente arricchito. Oggi rappresenta una sorgente di neutroni con uno spettro energetico non facilmente reperibile altrove. Per questo, nonostante la bassa potenza e le piccole dimensioni, la "qualità energetica" dei suoi neutroni lo rendono ancora competitivo. Le richieste, anche internazionali, che prevedono l'utilizzo del TAPIRO nel prossimo futuro, giungono da ambiti diversi quali, l'aerospazio, la fusione nucleare, il bruciamento degli attinidi minori, gli acceleratori di particelle, la misura di sezioni d'urto, il danneggiamento biologico. Di non secondaria importanza sono le collaborazioni con diverse Università italiane per il tirocinio e le attività di tesi degli studenti dei corsi di laurea magistrale in ingegneria e fisica. Importante sarà anche la progettazione di esperienze finalizzate alla validazione di tecniche di misure e modelli di calcolo innovativi. L'inserimento del TAPIRO nel circuito delle facility utilizzabili dall'ASI e la collaborazione con il CEA nel progetto AOSTA sugli attinidi minori sono, al momento, i programmi che richiederanno il maggiore impegno da parte del personale di esercizio e di manutenzione dell'impianto. Data la complessità del mantenere in operazione un impianto nucleare di ricerca, una condizione fondamentale per l'accesso semplice e veloce alle facility d'irraggiamento di questo tipo di impianti é avere un efficiente programma di manutenzione e di verifica dei sistemi importanti ai fini della sicurezza nucleare. La disponibilità di strutture di supporto di tipo organizzativo, progettuale e realizzativo, e la disponibilità di personale altamente qualificato sono state e

saranno sempre un prerequisito per ogni tipo di attività da realizzare con il reattore sorgente veloce TAPIRO.

#### **4. Documentazione**

##### **4.1. Elenco dei rapporti di progettazione del TAPIRO**

- Arc. 1 Specifiche per il progetto costruttivo dell'edificio, dei servizi ed impianti convenzionali. (Zona)
- Arc. 2 Specifiche per la confezione di provini in calcestruzzo pesante con inerti Edem e Italsider. (Musso, Sarto)
- Arc. 3 Specifiche per il progetto costruttivo del circuito scarichi attivi. (Zona)
- Arc. 3/A Specifiche per il progetto costruttivo del circuito scarichi attivi (addendum). (Zona)
- Arc. 4 Escursione incontrollata del reattore (da doc. DITE (64) IN "Analisi preliminare degli incidenti nucleari per il reattore TAPIRO")
- Arc. 5 Schema per la compilazione e la classificazione di documenti di lavoro. (Zona)
- Arc. 6 Modalità per il lavoro di segreteria, archivio e controllo spese relative al programma in corso
- Arc. 7 Prove su elettrovalvole a 3 vie per la misura dei tempi di diseccitazione. (Santangelo, Sarto)
- Arc. 8 Prove su frizioni elettromagnetiche a dischi multipli per la misura dei tempi di sgancio
- Arc. 9 Elenco parti reattore (Santangelo, Sarto, Zona)
- Arc. 10 Note sulle prove di esecuzione per le camicie del nocciolo TAPIRO (Zona)
- Arc. 11 Misure preliminari di perdita di una tenuta costituita da due superfici piane (Riccardelli, Santangelo)
- Arc. 12 Relazione sulle prove di deformazione carico su di una camicia del disco centrale del nocciolo del reattore TAPIRO (Di Bartolo)
- Arc. 002-LDJ.i.p Specifiche di esecuzione delle operazioni di saldatura delle

camicie del nocciolo del TAPIRO

- Arc. (nota) Ciclo di lavoro delle scatole del TAPIRO
- Arc. 13 Flussi neutronici e dosi gamma calcolati nel nocciolo e riflettore del reattore (Palamidessi)
- Arc. 14 Scelta delle guarnizioni per il circuito di refrigerazione del TAPIRO (Di Bartolo, Santangelo, Zona)
- Arc. 15 Note per la costruzione dell'edificio, dei servizi e degli impianti convenzionali. (Musso, Santangelo, Sarto)
- Arc. 16 Specifiche per il progetto costruttivo dei meccanismi. (Santangelo)
- Arc. 17 Specifiche per il progetto costruttivo del sistema di controllo, strumentazione nucleare e convenzionale. (Sarto)
- Arc. 17/1 Specifiche per il progetto costruttivo degli interventi automatici di sicurezza e del sistema di comando degli elementi di controllo. (Sarto)
- Arc. 18 Calcolo delle deformazioni a sollecitazioni nei dischi di U del nocciolo TAPIRO. (Santangelo)
- Arc. 19 Specifiche per il progetto costruttivo del nocciolo. (Musso, Santangelo)
- Arc. 19/1 Specifications for the construction design of TAPIRO core (Musso, Santangelo)
- Arc. 20 Specifiche per la costruzione del nocciolo (Musso, Santangelo)
- Arc. 20/1 Specifications for the fabrication of the TAPIRO core. (Musso, Santangelo)
- Arc. 21 Specifiche per il progetto costruttivo del contenitore fluido refrigerante (Santangelo)
- Arc. 22 Nota di accompagnamento alle richieste di offerta per la fabbricazione del nocciolo TAPIRO.
- Arc. 22/1 Further information on the call for tender for the fabrication of the TAPIRO core. (Musso)
- Arc. 23 Specifiche per il progetto costruttivo del riflettore (Musso)
- Arc. 24 Specifiche per il progetto costruttivo degli elementi di controllo. (Musso, Santangelo, Zona)
- Arc. 25 Specifiche per il progetto costruttivo del contenitore sotto pila. (Santangelo)

- Arc. 26 Prova di laboratorio per la determinazione della curva granulometrica della classe fine e degli scarti del campione di Manoriver – Halsider. (Di Bartolo)
- Arc. 27 Specifiche per la costruzione del complesso nocciolo-riflettore-elementi di controllo-meccanismi-contenitore fluido refrigerante. (Santangelo)
- Arc. 28 Specifiche per il progetto costruttivo dello schermo reattore e dei canali. (Santangelo)
- Arc. 29 Specifiche per il progetto dei circuiti. (Santangelo, Sarto)
- Arc. 30 Specifiche per il progetto costruttivo della colonna termica
- Arc. 31 Specifiche per la costruzione della grafite della colonna termica. (Musso, Palamidessi)
- Arc. 31/1 Specifications for the fabrication of the thermal column graphite (Musso, Palamidessi)
- Arc. 32 Specifiche per la costruzione ed il montaggio del contenitore sotto pila dello schermo reattore, canali e Colonna termica. (Santangelo, Musso)
- Arc. 33 Valutazione tecnico-economica delle offerte per la fabbricazione del nocciolo
- Arc. 34 Valutazione tecnico-economica delle offerte per la fabbricazione della grafite della colonna termica. (Palamidessi)
- Arc. 35 Valutazione tecnico-economica delle offerte per la realizzazione del complesso “riflettore, elementi controllo, meccanismi, contenitore fluido refrigerante”. (Santangelo)
- Arc. 36 Valutazione tecnico economica delle offerte per la fornitura e posa in opera del complesso “contenitore sotto pila – schermo – canali – involucro colonna termica”. (Santangelo)
- Arc. 37 Programmazione per cammino critico del reattore TAPIRO. (DI Bartolo, Musso, Santangelo, Sarto, Zona)
- Arc. 38 Istruzioni per l’uso dei programmi PERT – TAPIRO. (Di Bartolo)
- Arc. 39 Rispondenza ai fini della sicurezza nucleare e della produzione sanitaria di alcune parti del reattore. (Musso, Santangelo)
- Arc. 40 Valutazione tecnico economica delle offerte per la fornitura del circolatore di He. (Musso, Santangelo)

- Arc. 41 Procedura per il controllo, l'analisi e l'aggiornamento del programma PERT- TAPIRO. (Di Bartolo, Musso)
- Arc. 42 Specifiche per la costruzione e il montaggio dell'apparecchiatura di spostamento della colonna termica. (Santangelo)
- Arc. 43 Analisi preliminare dei metodi per i calcoli neutronici nello schermo del TAPIRO. (Palamidessi)
- Arc. 44 Controlli dimensionali su camicie di prova per il nocciolo del reattore TAPIRO. (Borgiani, Di Bartolo)
- Arc. 45 Valutazione tecnico economica delle offerte per la fornitura del gruppo di raffreddamento. (Musso)
- Arc. 46 Relazione sulla rispondenza ai fini della sicurezza nucleare e della protezione sanitaria dei progetti particolareggiati di costruzione. (Musso, Palamidessi, Santangelo, Sarto)
- Arc. 46/1 Addendum N° 1 al rapporto N° 46
- Arc. 46/2 Addendum N° 2 al rapporto N° 46
- Arc. 46/3 Addendum N° 3 al rapporto N° 46
- Arc. 46/4 Progetto particolareggiato sistema strumentazione e controllo reattore TAPIRO. (Sarto)
- Arc. 47 Considerazioni sulla riduzione della sorgente gamma dello schermo TAPIRO. (Palamidessi)
- Arc. 48 Specifiche per prove su calcestruzzo pesante per schermo biologico con inerte borato e non tarato. (Palamidessi)
- Arc. 49 Specifiche per la costruzione, montaggio e utilizzazione schermi tappo sicurezza, rimozione nocciolo mobile e attrezzature ausiliarie. (Santangelo)
- Arc. 50 Rapporto di sicurezza per il TAPIRO – Vol 1° - descrizione. (Musso, Santangelo, Sarto)
- Arc. 51 Rapporto di sicurezza per il TAPIRO – Vol 2° - Analisi sicurezza (Brunori, Musso, Santangelo)
- Arc. 52 Rapporto tecnico per il RSV TAPIRO (Musso)
- Arc. 53 RSV TAPIRO – piano emergenza interno. (Accorona)
- Arc. 54 RSV TAPIRO – regolamento esercizio. (Accorona)

- Arc. 55 RSV TAPIRO – manuale operazione. (Accorona, Musso, Sarto)
- Arc. 56 RSV TAPIRO – proposta prescrizioni tecniche. (Musso, Sarto)
- Arc. 56/B RSV TAPIRO – proposta prescrizioni tecniche (bozza)
- Arc. 57 Rapporto finale sicurezza per il RSV TAPIRO – Vol 1 – descrizione.
- Arc. 58 TAPIRO – Vol 2 – analisi sicurezza.
- Arc. 59a RSV TAPIRO – programma generale prova con combustibile nucleare. (Martini, Musso)
- Arc. 60 RSV TAPIRO – prove dell’impianto antecedente il caricamento del combustibile nucleare. (Musso, Sarto)
- Arc. 61 Contenitore stoccaggio combinate del combustibile fresco RSV-TAPIRO (Palamidessi)
- Arc. 62 Procedura utilizzo per le attrezzature sperimentali. (Martini)
- Arc. 63 Stato avanzamento lavori in relazione al programma stabilito dal Comitato di Gestione TAPIRO (DI Bartolo)

Elenco dei rapporti TAPIRO redatti da vari laboratori fino al 19/8/1971

1. Progetto di un reattore veloce per preparazione di tecniche sperimentali. Doc. DIFIR(63)50 CNR 1966, V. Farinelli ed altri.
2. Programma SPE.RAD.ATT 2 per calcoli dello spettro delle radiazioni ionizzanti emesse per decadimento radioattivo da materiale irraggiato. DI-TE(63)L.T.T: 10, Paoletti
3. Calcoli di attivazione per il reattore TAPIRO. Doc. DIFIR(63)30, Musso, Santangelo.
4. Reattore sorgente Veloce TAPIRO – Programma sperimentale -. Doc. DIFIR(64)38, V. Farinelli ed altri.
5. Use of a Fast source reactor for low level irradiation experiments. IAEA Study Group meeting on research reactor experiment technique. Bucarest 26-31/10/64, U. Farinelli.
6. Reattore Sorgente Veloce TAPIRO,. Progetto preliminare preventivi 1964.
7. Reattore Sorgente Veloce TAPIRO. Progetto preliminare. Elenco parti reattore 1964

8. Reattore TAPIRO valori orientativi del coefficiente di scambio termico del nocciolo. 20/07/1964, Matteuzzi.
9. Reattore sorgente Veloce TAPIRO – versione 5 kW -. 1965
10. Fail safe circuits for nuclear protective system. RT/EL(65)2, T. Businaro, L. Conti, M. Conti.
11. Reattore veloce sorgente TAPIRO – calcoli preliminari -. Doc. LFCR(65)6, B. Musso.
12. Note in margine all’esperimento critico di Harmonie. Doc. LFCR(65)36, B. Musso.
13. Relazione sulle specifiche di esecuzione delle saldature del core TAPIRO. Doc. (66)SO n. 1, De Jaco, Lepri, De Luigi.
14. Distribuzione di temperatura, velocità e pressione in condizioni di regime per un gas perfetto circolante in un condotto di refrigerazione in sezione variabile. Doc. Int. LFCR(66)4, Sarto
15. Calcolo della distribuzione di temperatura nel reattore TAPIRO. Doc. In. LFCR(66)11, A. Galati.
16. Carta identità programma PIA.GA. G.F., Di Bartolo, L. Londer.
17. Carta identità programma T.O.P.LESS. G.F., Di Bartolo.
18. Distribuzione spazio temporale di temperatura in mezzi semi infiniti sottoposti a particolari condizioni di transitorio termico. RT/ING(71)11, Musso, Zona.
19. Considerazioni preliminari sulla sicurezza del reattore (note).
20. Reattore Sorgente Veloce TAPIRO “Descrizione”. Doc. DIFIR(64)36, Musso, Santangelo, Sarto, Zona.
21. Reattore Sorgente Veloce TAPIRO “Analisi della sicurezza”. Doc. DIFIR(64)37, Musso, Santangelo, Sarto, Zona.
22. Reattore Sorgente Veloce TAPIRO 5 kW “Descrizione”. Addendum. Doc. DIFIR(65)27, Musso, Santangelo, Sarto, Zona.
23. Reattore Sorgente Veloce TAPRO 5 kW “Analisi della Sicurezza”. Addendum. Doc. DIFIR(65)30, Musso, Santangelo, Sarto, Zona.

24. Accident analysis for a fast source reactor. Energia Nucleare vol. 15 N. 7 luglio 1968. Doc. Int. IN(69)1 RI.C.A. N. 15, Mathis, Musso, Turrini.
25. Analytical Study of dynamics of a compact nuclear fast system. CNEN RT/ING(68)11 Energia Nucleare vol. 15 N. 3 marzo 1968, Musso.
26. Analisi preliminare degli incidenti nucleari per il reattore TAPIRO. Doc. DI.TE (64) IN 2 RAPTUR 16, Castellani, Mathis, Turrini.
27. Reattore sorgente Veloce TAPIRO – Considerazioni sul massimo incidente credibile - . Doc. Int. LFIR(68)j, Musso
28. Il primo reattore veloce italiano. Sapere, ottobre 1971

#### **4.2. Le pubblicazioni del TAPIRO**

Di seguito è riportata una lista, certamente non completa, delle pubblicazioni e delle presentazioni a congressi e rapporti tecnici in cui il TAPIRO compare per la produzione di risultati sperimentali o semplicemente perché citato. La lista copre l'intervallo di tempo che va dal 1963 ad oggi.

1963. U. Farinelli, G. Gambardella, A. Gandini, A. Mathis, B. Musso, A. Palamidessi & M. Santangelo: "Progetto di un reattore veloce per preparazione di tecniche sperimentali" presentato al convegno indetto dalla società lombarda di fisica – Milano-Pavia, dicembre 1963 e pubblicato su "Congressi, Convegni e Simposi Scientifici N. 9 – collana a cura dell'ufficio pubblicazioni del CNR
1971. N. Pacilio, T. Ferrari, P. Lorenzi "A micrologic integrated circuit for monitoring correlation in pulse sequences" - NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 92 (1971) I3-I7
1973. A. D'Angelo, M. Martini, M. Salvatores "The TAPIRO fast source reactor as a benchmark for nuclear data testing" - Energia Nucleare, vol. 20, n. 11, pagg. 614-621, 1973
1973. A. D'Angelo "beta\_eff and the Inhour Equation for U-235 Compact Fast Reactors" - Rapporto tecnico Comitato Nazionale Energia Nucleare RT/FI(73)30

1973. A. Palamidessi, A. Lori & M. Di Paola "Evaluation of neutron fluxes and gamma-rays dose in the vertical channels of the source fast reactor TAPIRO for radiobiological studies" - , Rapporto CNEN-RT/BIO—73-32, 1973
1973. M. Martini, P. Moioli & C. M. Romanelli "Sodium long-life activation in a fast reactor" - Rapporto CNEN-RT/FI—73-18, 1973
1973. A. D'Angelo, M. Martini & M. Salvatores "235U compact Cu-reflected TAPIRO reactor integral experiment results and a check of some high-energy ENDF/B-III data" - Trans Amer Nucl Soc, 498-499, 1977
1973. D. Gheorghe & M. Salvatores "A CNEN revised version of the RIGEL-ETOE-MC2 code system to generate multigroup cross sections and its use with ENDF/B-III data" - Rapporto CNEN-RT/FI—73-13, 1973
1973. N. Pacilio, V. M. Jorio, U. Farinelli, T. Ferrari, P. Lorenzi, D. Malosti & T. Businaro "Reactor-noise and stochastic neutronics at CSN Casaccia" – Rapporto CNEN-RT/FI--73-26
1973. A. D'Angelo, "La discrepanza di reattività in reattori veloci e compatti" – Rapporto CNEN RTI/FCR (73)9
1976. M. Vlasov (Ed.) "IAEA programme on Benchmark neutron fields applications for reactor dosimetry" - Rapporto IAEA dell'International Nuclear Data Committee INDC(SEC)--54/L+Dos, 1976
1976. A. D'Angelo "Sensitivity study of the effective fraction of delayed neutrons  $\beta_{eff}$  to basic data uncertainties for the TAPIRO and PEC fast reactors" - Energ Nucl (Milan), 23(12), 619-626, 1976
1977. F. Bouteau, D. Calamand, Y. Ocerai, R. Vienot, D. Antonini, L. Bozzi, M. Martini, P. Moioli, "Results of neutron-propagation experiments performed in iron-sodium mixtures using the source reactor HARMONIE and TAPIRO" - Proceedings of 5. International Conference on Reactor shielding, Knoxville, Tn, USA (19 Apr. 1977)
1977. M. Martini, M. Belli & M. F. Sirito "The TAPIRO fast source reactor as a benchmark to test activation detector cross sections" - Rapporto EUR—5667(pt2), Commission of the European Communities (CEC), 1977

1977. D. Calamand, A. Desprets & H. Rancurel, D. E. Bartine (Ed.) "Results of neutron propagation in steel sodium mixtures with various source spectra on Harmonie and TAPIRO" - United States: Science Press, 1977
1977. A. Fabry, H. Ceulemans, P. Vandeplass, W. N. McElroy & E. P. Lippincott "Reactor dosimetry integral reaction rate data in LMFBR Benchmark and standard neutron fields: status, accuracy and implications" - Rapporto EUR—5667(suppl),. Commission of the European Communities (CEC), 1977
1978. D. Antonini, M. L. Bargellini, L. Bozzi, M. Martini, P. Moioli "Esperienze di diffusione neutronica in sodio mediante il reattore sorgente veloce TAPIRO" - Comitato Nazionale Energia Nucleare RT/FI(78)4
1978. M. Martini, P. Moioli & F. Sirito "Progress report on detector cross section benchmark measurements in the TAPIRO reactor" - (IAEA--208(vol2)). International Atomic Energy Agency (IAEA)
1978. T. D. Beynon, R. H. Curtis & C. Lambert "The design and analysis of integral assembly experiments for CTR neutronics" - Rapporto IAEA—207, International Atomic Energy Agency (IAEA), 1978
1978. J. C. Estiot, J. P. Trapp, M. Salvatores & G. Palmiotti "Analysis of neutron propagation experiments in iron-sodium mixtures with the PROPANE calculational scheme for fast reactors" - Rapporto IAEA—207, International Atomic Energy Agency (IAEA)
1979. J. C. Estiot, M. Salvatores, J.P. Trapp, A. de Carli & V. Rado "Nuclear data for shielding calculations: Na cross-section adjustment using propagation experiments" - Rapporto CEA-CONF—4986, 1979
1980. C.A. Clarotti and A. Mattucci "Safety assessment for computerized nuclear reactor protection systems: the Markov approach" - Nuclear Engineering and Design 58 (1980) 349-358
1980. S. Bologna, E. de Agostino, A. Mattucci, P. Monaci, M. G. Putignani "A computerized protection system for a fast research reactor" - IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-27, No. 1, February 1980

1980. P. Hammer "Fast reactor physics at CEA: present studies and future prospects" - Rapporto CEA-CONF—5517, 1980. France
1981. M. Carta, A. De Carli, V. Rado, M. Salvatores & J.P. Trapp "Propagation experiments in steel-sodium media at TAPIRO". Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA): OECD, 1981
1981. M. Carta, A. De Carli, P. Moioli, "Esperienza di irraggiamento del mock-up della griglia del PEC", CNEN REPORT RIT/FIS-LTCR(81)1, 1981
1981. D. Antonini, M. Carta, A. De Carli, R. Martinelli, P. Moioli, "Programma NEFERTITI: esperienze e calcoli relativi alla prima configurazione", CNEN REPORT RIT/FIS-LTCR(81)1, 1981
1982. M. Carta, A. De Carli, R. Martinelli, P. Moioli, G. Daguzan, M. Salvatores, J. P. Trapp, "Spectrum characterization in a simulated FR blanket region via activation of threshold and continuous detectors", Proc. of the Fourth ASTM-EURATOM Symposium on Reactor Dosimetry, NUREG/CP 0029, VOL I, 211, Gaithersburg, Maryland, March 1982
1983. A. Russo, F. Pacchierotti and P. Metalli "Meiotic non-disjunction induced by fission neutrons relative to X-rays observed in mouse secondary spermatocytes I. The response of different cell stages to a single radiation dose" - Mutation Research, 108 (1983) 359-372
1983. M. Angelone, M. Carta, A. De Carli, P. Moioli, "Stato di avanzamento del programma NEFERTITI", ENEA REPORT FT-WHD-00002, 1983
1983. M. Carta, A. D'Angelo, F. Aversa, P. Mustarelli "Schematizzazione del TAPIRO per calcoli neutronici in geometria R,Z" - rapporto tecnico ENEA VT-WHC-00005
1984. M. Carta, "Esperienza di caratterizzazione del reattore TAPIRO: valutazione degli effetti introdotti dalla grafite della colonna termica", ENEA REPORT VT-WHC-00024, 1984
1985. M. Carta, A. D'Angelo, P. Mustarelli "Esperienza di caratterizzazione del reattore TAPIRO: risultati preliminari dei calcoli in teoria del trasporto" - rapporto tecnico ENEA VT-WHC-00025

1985. M. Carta "Esperienza di caratterizzazione del reattore TAPIRO: stato di avanzamento per la parte calcolo e interpretazione" - Rapporto tecnico ENEA VT-WHC-00039
1987. F. Pacchierotti, A. Russo and P. Metalli "Meiotic non-disjunction induced by fission neutrons relative to X-rays observed in mouse secondary spermatocytes II. Dose-effect relationships after treatment of pachytene cells" - Mutation Research, 176 (1987) 233-241
1987. M. Carta, A. D'Angelo, N. Davidovich, "Confronto fra due biblioteche di sezioni d'urto nell'ambito delle esperienze di caratterizzazione del reattore TAPIRO", ENEA REPORT VT-WHC-00045, 1987
1989. A. Fabry et al., "Neutronic characterization of the TAPIRO fast-neutron source reactor" -Rapporto ENEA-SCK•CEN Mol, 1989
1990. A. Fabry, 8. Alt Abderrahim. P. D'hondt. S. De Leeuw, G. De Leeuw-Gierts, G. Minsart "Learning from a joint Italian-Belgian neutronic characterization of the TAPIRO source reactor" - ASTM-EURATOM symposium on Reactor Dosimetry, Strasbourg 27-31 Ang 1990,7/10
1992. M. Coppola "Specification of fast neutron radiation quality from cell transformation data" - Rapporto ETDE-IT—94-08, 1992
1992. S. Koshizuka, Y. Oka & I. Saito "Researches at the University of Tokyo fast neutron sources reactor, YAYOI" - Rapporto JAERI-M—92-028, 1992. Japan
1992. A. Saran, M. Coppola, V. Di Majo, S. Rebessi, S. Pazzaglia, L. Pariset, V. Covelli, J. J. Broerse & H. Zoetelief "C3H10T1/2 cell transformation after fractionated doses of neutrons of different energies" - Rapporto ETDE-IT--94-21
1993. M. Coppola "Specification of fast neutron radiation quality from cell transformation data" - Radiation Protection Dosimetry Vol. 46 No. 3 pp. 211-212 (1993)
1994. P. Pihet, M. Coppola, T. Loncol, V. Di Majo, H.G. Menzel "Microdosimetry Study of Radiobiological Facilities at the RSV - TAPIRO Reactor" - Radiation Protection Dosimetry, Volume 52, Issue 1-4, 1 April 1994, Pages 409–414,

1998. Y.Oka, S.Koshizuka, I.Saito, K.Okamura, N.Aizawa, N.Sasuga, T.Sukegawa, T.Terakado, Y.Mabuchi, T.Nakagawa, S.An “Fast neutron source reactor, YAYOI” - Progress in Nuclear Energy Volume 32, Issues 1–2, 1998, Pages 3-10
- 1998 F. Cavallari “Progress on avalanche photodiodes for the CMS electromagnetic calorimeter” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 409 (1998) 564—569
1998. S. Baccaro, B. Borgia, F. Cavallari, I. Dafinei, M. Diemoz, A. Festineso, E. Longo, M. Montecchi, G. Organtini, A. Piegari “Detection of photons generated in PbWO<sub>4</sub> scintillator crystals” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 406 (1998) 276-286
1998. F. Cavallari “Progress on Avalanche Photodiodes as photon detectors for PbWO<sub>4</sub> crystals in the CMS experimen” - Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 61B (1998) 449-455
1998. U.Biggeri, E.Borchi, M.Bruzzi, Z.Li and E.Verbitskaya “Radiation Damage on Silicon after very high Neutron Fluence Irradiation” - Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 61B (1998) 475-480
1998. E.Borchi, M.Bruzzi, C.Leroy, S.Pirollo and S.Sciortino “Electrical characteristics and charge collection efficiency of silicon detectors irradiated with very high neutron and proton fluences” - Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 61B (1998) 481-486
1998. A. Tata, A. Festinesi & R. Rosa “Radiation technology facilities operating at the italian ENEA-Casaccia research center” - Rapporto ENEA-RT-INN—98-01, 1998
1999. M. M. Angarano, A. Ba H der, D. Creanza, M. de Palma, L. Fiore, G. Maggi, S. My, G. Raso, G. Selvaggi, P. Tempesta “Characterization and simulation of a single-sided, n+ on n silicon microstrip detector before and after neutron irradiation” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 428 (1999) 336-347
1999. E. Borchi, M. Bruzzi, Z. Li, S. Pirollo “A two-level model for heavily irradiated silicon detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 425 (1999) 343-346
1999. V.G. Palmieri, E. Borchi, L. Casagrande, C. Da Via , A. Esposito, S. Pagano, S. Pirollo “Liquid He cooled silicon for radiation-hard hybrid superconducting pixel

- detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 426 (1999) 56-60
1999. S. Baccaro, J.E. Bateman, F. Cavallari, V. Da Ponte, K. Deiters, P. Denes, M. Diemoz, Th. Kirn, A.L. Lintern, E. Longo, M. Montecchi, Y. Musienko, J.P. Pansart, D. Renker, S. Reucroft, G. Rosi, R. Rusack, D. Ruuska, R. Stephenson, M.J. Torbet “Radiation damage effect on avalanche photodiodes” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 426 (1999) 206-211
1999. William H. Bell, Luca Casagrande, Cinzia Da Via, Valeria Granata, Vittorio G. Palmieri “Temperature dependence of the charge collection efficiency in heavily irradiated silicon detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 435 (1999) 187-193
1999. C. da Via, W.H. Bell, L. Casagrande, V. Granata, V.G. Palmieri “Cryogenic temperature performance of heavily irradiated silicon detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 434 (1999) 114-117
1999. V. Puill “Recent results on APDs for CMS ECAL” - Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 78 (1999) 703-707
1999. F. Mattioda, A. Merlone, S. Agosteo, K.W. Burn, R. Tinti, G. Capannesi, G. Rosi, F. Casali, E. Nava & G. Gambarini. “Boron neutron capture therapy. Energia Ambiente e Innovazione”, 1999 45(4), 27-39.
1999. K. W. Burn, M. Carta, E. Nava, G. Rosi, “Results of Monte Carlo neutronic calculations on the TAPIRO core for the reevaluation of the operating reactor power”, ENEA REPORT TLE TAPIRO 98/B-005, 1999.
2000. M. M. Angarano, A. Báder, D. Creanza, M. de Palma, L. Fiore, G. Maggi, S. My, V. Radicci, G. Raso, G. Selvaggi, L. Silvestris, P. Tempesta, S. Albergo, R. Potenza “Beam test results on n<sup>+</sup>-on-n type silicon microstrip detectors before and after neutron irradiation” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440 (2000) 136-150
2000. G. Gambarini, S. Agosteo, P. Marchesi, E. Nava, P. Palazzi, A. Pecci, G. Rosi, R. Tinti “Discrimination of various contributions to the absorbed dose in BNCT: Fricke-

gel imaging and intercomparison with other experimental results” - Applied Radiation and Isotopes 53 (2000) 765-772

2001. A. Cavallini, B. Fraboni, N. Auricchio, E. Caroli, W. Dusi, P. Chirco, M. P. Morigi, M. Zandarini, M. Hage-Ali, P. Siffert, P. Fougeres “Irradiation-induced defects in CdTe and CdZnTe detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 458 (2001) 392-399
2001. M. Montecchi, Q. Ingram “Study of some optical glues for the Compact Muon Solenoid at the large hadron collider of CERN” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 465 (2001) 329–345
2001. S. Agosteo, A. Foglio Para, G. Gambarini, L. Casalini, K. W. Burn, R. Tinti, G. Rosi, A. Festinesi, E. Nava “Design of neutron beams for boron neutron capture therapy in a fast reactor” - (IAEA-TECDOC-1223). International Atomic Energy Agency (IAEA)
2002. S. Agosteo, L. Castellani, G. D’Angelo, F. Dal Corso, G.M. Dallavalle, M. De Giorgi, C. Fernandez, F. Gonella, I. Lippi, J. Marin, R. Martinelli, A. Montanari, F. Odorici, J.C. Oller, M. Pegoraro, G. Torromeo, R. Travaglini, M. Verlatto, C. Willmott, P. Zotto “Single event effects measurements on the electronics for the CMS muon barrel detector at LHC” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 489 (2002) 357–369
2002. B. Montagnini, N. Cerullo, J. Esposito, V. Giusti, F. Mattioda, R. Varone “Spectrum shaping of accelerator-based neutron beams for BNCT” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 476 (2002) 90–98
2002. A. Cavallini, B. Fraboni, W. Dusi, N. Auricchio, P. Chirco, M. Zandarini, P. Siffert, P. Fougeres “Radiation effects on II–VI compound-based detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 476 (2002) 770–778
2002. M. M. Angarano, G. M. Bilei, P. Ciampolini, M. Giorgi, A. Mihul, O. Militaru, D. Passeri, A. Scorzoni “Characterization of neutron irradiated, low-resistivity silicon detectors” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 477 (2002) 308–312

2002. Y. Musienko "The CMS electromagnetic calorimeter" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 494 (2002) 308–312
2003. S. Agosteo, C. Birattari, G. D'Angelo, F. Dal Corso, A. Foglio Para, I. Lippi, A. Pola, P. Zotto "Neutron spectrometry with a recoil radiator-silicon detector device" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 515 (2003) 589–604
2003. Robert W. Roussin, Bernadette L. Kirk, David K. Trubey "Radiation Shielding and Protection" - Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition) 2003, Pages 581-612
2003. L. De Nardo, E. Seravalli, G. Rosi, J. Esposito, P. Colautti, V. Conte and G. Torielli "BNCT microdosimetry at the Tapiro reactor thermal column" - Radiation Protection Dosimetry (2004), Vol. 110, Nos 1-4, pp. 579-586
2004. S. Baccaro, A. Cemmi, C. Colombi, M. Fiocca, G. Gambarini, B. Lietti, G. Rosi "In-phantom dose mapping in neutron capture therapy by means of solid state detectors" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 213 (2004) 666–669
2004. K.W. Burn, L. Casalini, S. Martini, M. Mazzini, E. Nava, C. Petrovich, G. Rosi, M. Sarotto, R. Tinti "An epithermal facility for treating brain gliomas at the TAPIRO reactor" - Applied Radiation and Isotopes 61 (2004) 987–991
2004. G. Gambarini, V. Colli, S. Gay, C. Petrovich, L. Pirola, G. Rosi "In-phantom imaging of all dose components in boron neutron capture therapy by means of gel dosimeters" - Applied Radiation and Isotopes 61 (2004) 759–763
2004. K. W. Burn, V. Colli, G. Curzio, F. d'Errico, G. Gambarini, G. Rosi and L. Scolari "Characterisation of the TAPIRO BNCT epithermal facility" - Radiation Protection Dosimetry (2004), Vol. 110, Nos 1-4, pp. 651-654
2004. A. Cecilia, S. Baccaro, A. Cemmi, V. Colli, G. Gambarini, G. Rosi and L. Scolari "Alanine and TLD coupled detectors for fast neutron dose measurements in neutron capture therapy (NCT)" - Radiation Protection Dosimetry (2004), Vol. 110, Nos 1-4, pp. 637-640

2004. L. De Nardo, E. Seravalli, G. Rosi, J. Esposito, P. Colautti, V. Conte and G. Torielli "BNCT microdosimetry at the TAPIRO reactor thermal column" - Radiation Protection Dosimetry (2004), Vol. 110, Nos 1-4, pp. 579-586
2005. S. Baccaro, A. Cecilia, A. Venezia, A. Fedorov, M.V. Korzhik, A. Barisevich, V. Domenev "Radiation damage of REAlO<sub>3</sub> : Ce<sup>3+</sup> (RE=Y, Lu) scintillators under  $\gamma$  and neutron irradiation" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 537 (2005) 431–434
2005. C. Manfredotti, A. Lo Giudice, F. Fasolo, E. Vittone, C. Paolini, F. Fizzotti, A. Zanini, G. Wagner, C. Lanzieri "SiC detectors for neutron monitoring" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 552 (2005) 131-137
2005. S. Agosteo, P.G. Fallica, A. Fazzi, A. Pola, G. Valvo, P. Zotto "A feasibility study of a solid-state microdosimeter" - Applied Radiation and Isotopes 63 (2005) 529-535
2005. G. Rosi, S. Agosteo, K.W. Burn, L. Casalini, M. Cortesi, F. d'Errico, G. Gambarini, S. Gay, E. Nava, M. Sarotto "Role of the TAPIRO Fast Research Reactor in Neutron Capture Therapy in Italy. Calculations and Measurements" - Research Reactor Utilization, Safety, Decommissioning, Fuel and Waste Management, Proceedings of IAEA international conference 10-14 novembre 2003 Santiago, Chile
2005. E. Nava, K. W. Burn, L. Casalini, P. Ferrari, G. Gualdrini, G. Rosi, R. Tinti "Il progetto di BNCT al reattore TAPIRO" - AIRP – Convegno Nazionale di Radioprotezione: Campi neutronici nella terapia medica Catania, 15-17 settembre 2005
2005. E. Nava, K. W. Burn, L. Casalini, C. Petrovich, G. Rosi, M. Sarotto and R. Tinti "Monte Carlo optimisation of a BNCT facility for treating brain gliomas at the TAPIRO reactor" - Radiation Protection Dosimetry (2005), Vol. 116, No. 1–4, pp. 475-481
2005. "THE ENEA-CASACCIA RESEARCH REACTORS current status" - TRT-IGORR Joint Meeting - Gaithersburg, MD September 12-16, 2005
2006. K. W. Burn, L. Casalini, D. Mondini, E. Nava, G. Rosi and R. Tinti "The epithermal neutron beam for BNCT under construction at TAPIRO: Physics" - Journal of Physics: Conference Series 41 (2006) 187-194

2006. A Pisent, P. Colautti, J Esposito, L. De Nardo, V. Conte, D. Agosteo, G. Jori, P.A. Posocco, L.B. Tecchio, R. Tinti, G. Rosi "Progress on the accelerator based SPES-BNCT project at INFN Legnaro" - Journal of Physics: Conference Series 41 (2006) 391-399
2006. G. Gambarini, S. Agosteo & S. Altieri "Dose imaging with gel dosimeters in phantoms exposed in reactor thermal columns designed for BNCT2 sIn Nakagawa, Yoshinobu Kobayashi, Tooru, Kobayashi, Tooru, & Fukuda, Hiroshi (Eds.). Advances in neutron capture therapy 2006 Proceedings of 12th international congress on neutron capture therapy, (p. 638). Japan
2006. IRPhE-TAPIRO-ARCHIVE, Fast neutron source reactor primary documents, reactor physics experiments. (Mar 2006). Bibliographic information available from INIS: [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:40064936](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:40064936) Available on-line: <http://www.nea.fr/abs/html/nea-1764.html>
2007. A. Triolo, M. Marrale, M. Brai "Neutron-gamma mixed field measurements by means of MCP-TLD600 dosimeter pair" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 264 (2007) 183-188
2007. E. Meoni, P. Branchini, S. Di Luise, E. Graziani, L. La Rotonda, C. Mazzotta, G. Morello, A. Passeri, F. Petrucci, A. Policicchio, D. Salvatore, M. Schioppa, A. Tonazzo "Gamma and neutron massive irradiation tests of the ATLAS MDT chambers" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 187-188
2007. P. Branchini, S. Di Luise, E. Graziani, C. Mazzotta, E. Meoni, G. Morello, A. Passeri, F. Petrucci, A. Policicchio, D. Salvatore, M. Schioppa "Neutron irradiation test on ATLAS MDT chambers" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 574 (2007) 57-64
2007. P. Branchini, S. Di Luise, E. Graziani, C. Mazzotta, E. Meoni, G. Morello, A. Passeri, F. Petrucci, A. Policicchio, D. Salvatore, M. Schioppa "ATLAS MDT chamber behaviour after neutron irradiation and in a high rate background" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 581 (2007) 171-174

2007. A. Lo Giudice, F. Fasolo, E. Durisi, C. Manfredotti, E. Vittone, F. Fizzotti, A. Zanini, G. Rosi "Performances of 4H-SiC Schottky diodes as neutron detectors" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 583 (2007) 177-180
2007. D. Salvatore, P. Branchini, S. Di Luise, E. Graziani, C. Mazzotta, E. Meoni, G. Morello, A. Passeri, F. Petrucci, A. Policicchio, M. Schioppa "Neutron intensive irradiation test on ATLAS MDT chambers at TAPIRO nuclear reactor" - Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 172 (2007) 183-186
2007. M. Marrale, M. Brai, G. Gennaro, A. Triolo, A. Bartolotta "Improvement of the LET sensitivity in ESR dosimetry for  $\gamma$ -photons and thermal neutrons through gadolinium addition" - Radiation Measurements 42 (2007) 1217 – 1221
2007. M Brai, M Marrale, G Gennaro, A Bartolotta, M C D'Oca and G Rosi "Improvement of ESR dosimetry for thermal neutron beams through the addition of gadolinium" - Phys. Med. Biol. 52 (2007) 5219-5230
2007. J. Esposito, G. Rosi and S. Agosteo "The new hybrid thermal neutron facility at TAPIRO reactor for BNCT radiobiological experiments" - Radiation Protection Dosimetry (2007), Vol. 126, No. 1 –4, pp. 69-73
2007. P. Ferrari, G. Gualdrini, E. Nava and K. W. Burn "Preliminary evaluations of the undesirable patient dose from a BNCT treatment at the ENEA-TAPIRO reactor" - Radiation Protection Dosimetry (2007), Vol. 126, No. 1–4, pp. 636-639
2007. M. Marrale, M. Brai, G. Gennaro, A. Triolo, A. Bartolotta, M.C. D'Oca and G. Rosi "Alanine blends for ESR measurements of thermal neutron fluence in a mixed radiation field" - Radiation Protection Dosimetry (2007), Vol. 126, No. 1 –4, pp. 631-635
2008. J. Esposito, C. Ceballos, M. Soncin, C. Fabris, E. Friso, D. Moro, P. Colautti, G. Jori, G. Rosi, E. Nava "Feasibility of BNCT radiobiological experiments at the HYTHOR facility" - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266 (2008) 2587-2593
2008. "Exposure of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-alanine and Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ammonium tartrate ESR dosimeters to thermal neutrons: Experiments and Monte Carlo simulations" - Radiation Measurements 43 (2008) 471-475

2008. G. Gambarini, F. Gallivanone, M. Carrara, S. Nagels, L. Vogtlander, G. Hampel, L. Pirola "Study of reliability of TLDs for the photon dose mapping in reactor neutron fields for BNCT" - Radiation Measurements 43 (2008) 1118-1122
2009. Fabio Cardone, Giovanni Cherubini, Andrea Petrucci "Piezonuclear neutrons" - Physics Letters A 373 (2009) 862-866
2009. D. Moro, P. Colautti, M. Lollo, J. Esposito, V. Conte, L. De Nardo, A. Ferretti, C. Ceballos "BNCT dosimetry performed with a mini twin tissue-equivalent proportional counters (TEPC)" - Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) S171–S174
2009. S. Almaviva, M. Marinelli, E. Milani, G. Prestopino, A. Tucciarone, C. Verona, G. Verona-Rinati, M. Angelone, M. Pillon "Thermal neutron dosimeter by synthetic single crystal diamond devices" - Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) S183-S185
2009. G. Jori, M. Soncin, E. Friso, M.G.H. Vicente, E. Hao, G. Miotto, P. Colautti, D. Moro, J. Esposito, G. Rosi, E. Nava, G. Sotti, C. Fabris "A novel boronated-porphyrin as a radio-sensitizing agent for boron neutron capture therapy of tumours: In vitro and in vivo studies" - Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) S321–S324
2009. A. Santagata, M. Carta, O. Fiorani, R. Rosa "The ENEA TAPIRO Fast-Source Reactor for Neutronic Research" - IAEA International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities FR09, 7–11 December 2009 Kyoto, Japan
2009. M. Carta, O. Fiorani, R. Rosa, A. Santagata "The TAPIRO Fast-Neutron Source Reactor as a support to Nuclear Data Assessment" - IAEA Proceedings of the IAEA Technical Meeting in collaboration with NEA on Specific Applications of Research Reactors: Provision of Nuclear Data, 12 - 16 October 2009, Vienna, Austria
2009. R. Rosa, M. Carta, O. Fiorani, A. Santagata "Some essential features of the TAPIRO Fast-Neutron Source Reactor located at ENEA-CRE Casaccia (Rome)" - 12th IGORR October 28– 30, 2009, Beijing, P.R.China
2010. G. Gambarini, G. Bartesaghi, J. Burian, M. Carrara, M. Marek, A. Negri, L. Pirola, L. Viererbl "Fast-neutron dose evaluation in BNCT with Fricke gel layer detectors" - Radiation Measurements 45 (2010) 1398e1401

2010. A. Santagata, O. Fiorani, R. Rosa, M. Carta “The TAPIRO Research Reactor: a Support to ADS and Fast Neutron Reactor Development” - European Nuclear Conference (ENC) 2010, 30 maggio– 2 giugno 2010, Barcellona, Spagna
2010. Yu. A. Kurachenko, & D. N. Moiseenko “The MARS and TAPIRO low power reactors for neutron capture therapy applications” - Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij Yadernaya Ehnergetika, (1), 153-163, 2010
2012. A. Santagata, M. Sepielli, R. Bove, O. Fiorani, E. Santoro, M. Palomba “The ENEA’s nuclear facilities in the Mediterranean Research Reactor” - Report of the IAEA Technical Meeting on Research Reactor Coalitions: Concerted actions in the Mediterranean Region 10 -13 July 2012, Istanbul, Turkey
2013. Laura Evangelista, Giulio Jori, Domenico Martini, Guido Sotti “Boron neutron capture therapy and <sup>18</sup>F-labelled borophenylalanine positron emission tomography: A critical and clinical overview of the literature” - Applied Radiation and Isotopes 74 (2013) 91–101 2013. M. Carta, M. Palomba “TRIGA RC-1 and TAPIRO ENEA Research Reactors” - IAEA Consultancy meeting - Development of a RRs Catalogue Vienna, June 10-12, 2013
- 2013 . M. Sepielli, F. Pisacane, L. Ricci, A. Santagata, A. Gandini, T. Murgia, L. Cretara, V. Peluso, M. Carta, V. Fabrizio “Fast research reactor for generation IV technologies” - Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios, Paris, 4-7 March 2013.
2013. C. Abbate, M. Alderighi, S. Baccaro, G. Busatto, M. Citterio, P. Cova, N. Delmonte, V. De Luca, S. Fiore, S. Gerardin, E. Ghisolfi, F. Giuliani, F. Iannuzzo, A. Lanza, S. Latorre, M. Lazzaroni, G. Meneghesso, A. Paccagnella, F. Rampazzo, M. Riva, A. Sanseverino, R. Silvestri, G. Spiazzi, F. Velardi, E. Zanoni ( “Radiation performance of new semiconductor power devices for the LHC experiment upgrades” - Proceedings, 11th International Conference on Large Scale Applications and Radiation Hardness of Semiconductor Detectors (RD 13)
2013. A. Gandini, L. Ricci, N. Burgio ”Valutazione della Rappresentatività di Esperienze di Trasporto Neutronico in Piombo in una Facility Collocata nel Vano Colonna Termica del Reattore TAPIRO” - Report RdS/PAR2013/016, Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico ENEA Piano Annuale di Realizzazione 2013

2014. N. Burgio, L. Cretara, M. Frullini, A. Gandini, V. Peluso, A. Santagata “Monte Carlo simulation analysis of integral data measured in the SCK-CEN/ENEA experimental campaign on the TAPIRO fast reactor. Experimental and calculated data comparison” - Nuclear Engineering and Design 273 (2014) 350-358
2014. F. Addesa, F. Cavallari “Performance prospects for the CMS electromagnetic calorimeter barrel avalanche photodiodes for LHC phase I and phase II: Radiation hardness and longevity” - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 787 (2015) 114-116
2014. M. Angelone, A. Klix, M. Pillon, P. Batistoni, U. Fischer, A. Santagata “Development of self-powered neutron detectors for neutron flux monitoring in HCLL and HCPB ITER-TBM” - Fusion Engineering and Design 89 (2014) 2194–2198
2014. N. Burgio, A. Santagata, M. Frullini “Validation of the Monte Carlo model of TAPIRO Fast Reactor using MCNPX on ENEA-GRID/CRESCO facility” - rapporto ENEA, High Performance Computing on CRESCO infrastructure: research activities and results 2013
2014. M. Prata, D. Alloni, P. De Felice, M. Palomba, A. Pietropaolo, M. Pillon, L. Quintieri, A. Santagata, and P. Valente “Italian neutron sources” Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 255
2015. M. Pillon, C. Monti, G. Mugnaini., C. Neri, P. Rossi, M. Carta, O. Fiorani, A. Santagata “Study of the response of a piezoceramic motor irradiated in a fast reactor up to a neutron fluence of  $2.77E+17$  n/cm<sup>2</sup>” - Fusion Engineering and Design 96–97 (2015) 329-333
2015. M. Carta, P. Console, V. Fabrizio, O. Fiorani, A. Grossi, V. Peluso, A. Santagata, F. Boccia, A. Gandini, C. Bethaz, P. Ravetto “TAPIRO: feasibility study of minor actinides irradiation campaign”, rapporto ENEA ADPFISS-LP2- 83, Ricerca di Sistema Elettrico Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico ENEA su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

2015. M. Osipenko, F. Pompili, M. Ripani, M. Pillon, G. Ricco, B. Caiffi, R. Cardarelli, G. Verona-Rinati, S. Argiro "Test of a prototype neutron spectrometer based on diamond detectors in a fast reactor," 2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), Lisbon, 2015, pp. 1-7
2016. K. W. Burn, P. Console "Development and Application of Monte Carlo Neutronics Methodologies for Safety Studies of Current Operating Reactors" - Rapporto ENEA ADPFISS-LP1-079, Ricerca di Sistema Elettrico Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico ENEA su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
2016. M. Carta, V. Fabrizio, A. Grossi, V. Peluso, C. Caron, S. Dulla, P. Ravetto "Assessment of a cross section adjustment formalism using experimental data from the TAPIRO reactor" - Rapporto ENEA ADPFISS-LP2-116, Ricerca di Sistema Elettrico Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico ENEA su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
2016. M. Carta, P. Blaise, C. Bethaz, F. Boccia, V. Fabrizio, B. Geslot, A. Grossi, and A. Gruel "Feasibility study of the AOSTA experimental campaign" - EPJ Web of Conferences 111, 07003 (2016)
2017. O. Dicuonzo, V. Fabrizio, D. Caron, S. Dulla, M. Carta, P. Ravetto "Computational Analysis of TAPIRO Experiments by the SERPENT and ERANOS Codes" - M&C 2017 - International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering, Jeju, Korea, April 16-20, 2017, on USB (2017)
2017. A. F. Sedda, G. Rossi "Efficiency calibration of NaI(Tl) detector for  $^{16}\text{N}$  by point source and dynamic isotopic flow system generated in a nuclear reactor" - Rapporto ENEA RT/2017/15/ENEA
2017. O. Dicuonzo, V. Fabrizio, D. Caron, A. Dulla, M. Carta, P. Ravetto "Computational Analysis of TAPIRO Experiments by the SERPENT and ERANOS Codes" - International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering M&C 2017
2017. M. Carta, M. Cesaroni, M. G. Iorio et al., "Research Reactors for the development of materials and fuels for innovative nuclear energy systems", IAEA NUCLEAR

ENERGY SERIES NO. NP-T-5.8, International Atomic Energy Agency, Vienna, September 2017. IAEAL 17-01107, ISBN 978–92–0–100816–9

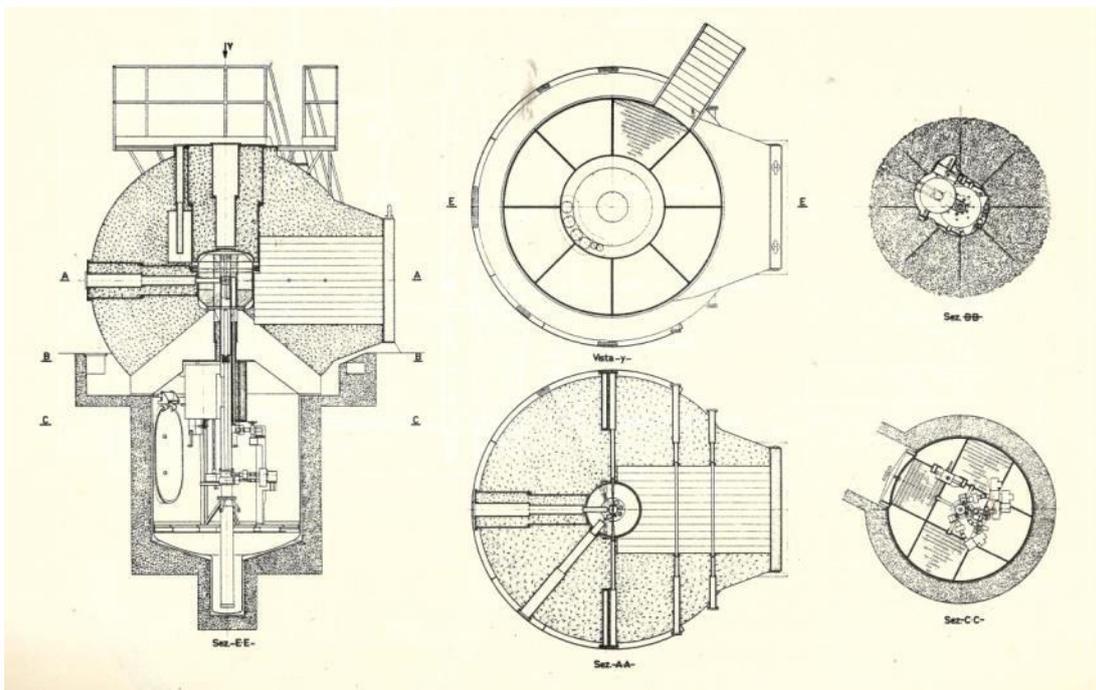
2017. M. Carta, K. W. Burn, P. Console Camprini, V. Fabrizio, L. Falconi, A. Santagata, S. Dulla, P. Ravetto, “TAPIRO fast spectrum research reactor for neutron radiation damage analyses”, IGORR 18, Sydney Australia, 3-7 December 2017
2018. I. Vilardi, A. Barbano, B. Bianchi, M. Bruni, M. Cesaroni, M. Cibelli, G. Cicoli, Di C. Geremia, L. Falconi, M. Ferri, A. Ratto, P. Ricci, A. Santagata “Programma della sorveglianza fisica ambientale e personale della radioprotezione durante le operazioni di rimozione manuale della pastiglia di calibrazione dal nocciolo dell’Impianto nucleare RSV TAPIRO del C.R. ENEA Casaccia” - XXXVII Congresso Nazionale AIRP di Radioprotezione Bergamo – Centro Congressi Papa Giovanni XXIII 17 – 19 ottobre 2018
2018. C. Di Gesare, D. Caron, S. Dulla, P. Ravetto, M. Carta & V. Fabrizio “Use of new nuclear data libraries for the Monte Carlo analysis of neutronic measurements in the TAPIRO reactor” - PHYSOR 2018: reactor physics paving the way towards more efficient systems, Mexico: Sociedad Nuclear Mexicana
2019. V. Fabrizio, M. Carta, P. Blaise, M. Cesaroni, L. Falconi, B. Geslot, A. Grossi, A. Santagata, “Neutron characterization of the TAPIRO fast neutron source reactor after the restoring of the nominal configuration”, International Conference on Research Reactors: Addressing Challenges and Opportunities to Ensure Effectiveness and Sustainability, 25–29 November 2019, Buenos Aires, Argentina
2020. M. Carta “Rediscovering the Fabry TAPIRO book: a journey through the experimental nuclear reactor physics.” - Rapporto ENEA FSN FISS RNR (20) 27

## 5. FIGURE E FOTOGRAFIE

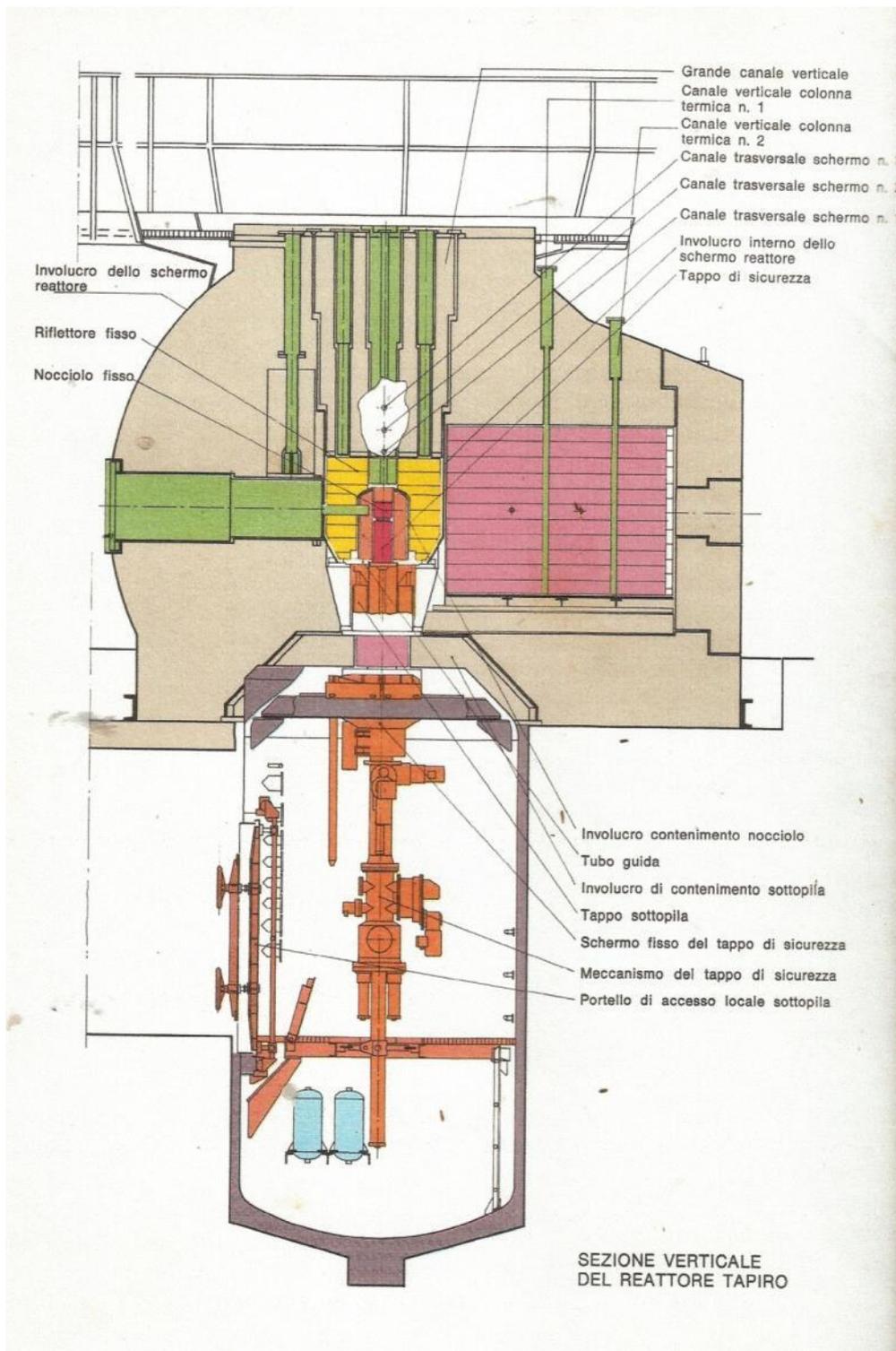
(1a parte)



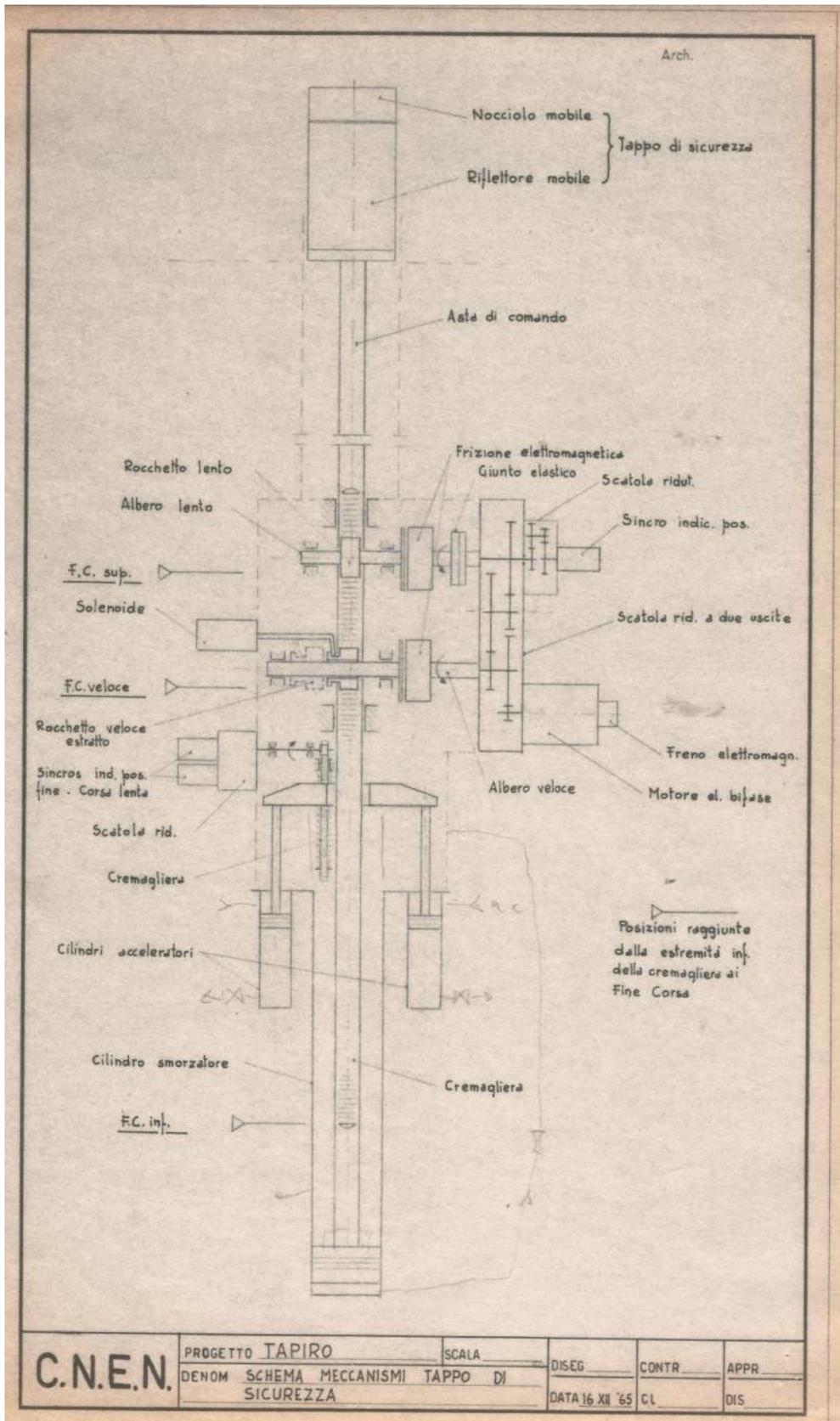
**Figura 1:** il Gruppo di Lavoro originale (1965). Da destra Musso, Palamidessi, Sarto, Santangelo e Zona



**Figura 2:** il Tapiro da 1 kW, il blocco pila



**Figura 3:** TAPIRO 5 kW, il blocco pila



**Figura 4:** schema del meccanismo del tappo di sicurezza

*Copia ricevuta durante la riunione con l'Ing. Franco del 6-7-65*



COMITATO NAZIONALE  
PER L'ENERGIA NUCLEARE

SEGRETERIA GENERALE

**OGGETTO:** Costruzione di un reattore  
sorgente veloce "Tapiro" presso il  
Centro di Studi Nucleari della Casac-  
cia -  
59ª riunione della Commissione Diret-  
tiva del CNEN del 4 giugno 1965.

Doc. CNEN (65) 91

**C.N.E.N. - CASACCIA**  
21. GIU 1965  
PROT. N. 3545  
DIREZIONE

e p.c.

18 GIU, 1965

ROMA,  
VIA BELISARIO, 15

Posiz. 2-m/1  
Prot. n. 626/CD

Al Settore Ricerca Nucleare  
Applicata  
Al Servizio Collegamento Settori  
Alla Divisione Amministrativa  
All'Ufficio Legale  
Alla Direzione del Centro di Studi  
Nucleari della Casaccia

LORO SEDI

Si comunica che la Commissione Direttiva preso atto di quanto conte-  
nuto nel Doc. CNEN (65) 91, ha deliberato di approvare il programma relativo  
alla progettazione e costruzione del reattore sorgente da 5 K<sup>w</sup> - Reattore Ta-  
piro - presso il Centro di Studi Nucleari della Casaccia per un importo totale  
di L. 210.000.000,-, escluse le spese di personale, di cui L. 120.000.000,-  
graveranno sull'esercizio finanziario 1966 e L. 84.000.000,- sull'esercizio  
finanziario 1967.

La Commissione Direttiva ha inoltre deliberato di dare mandato al  
Vice Presidente di decidere circa l'opportunità di affidare all'esterno parte  
della progettazione costruttiva di dettaglio del reattore per un importo pari a  
L. 30.000.000,- che dovrà eventualmente gravare sul bilancio relativo all'eser-  
cizio finanziario 1966.

Si comunica infine che la suddetta deliberazione è stata sottoposta  
per l'approvazione al Ministero dell'Industria e Commercio, ai sensi dell'ar-  
ticolo 6, comma VII della Legge 11 agosto 1960, n. 933.

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
IL SEGRETARIO GENERALE //

*S.B.  
Mare all'alta documentazione  
del "Tapiro" che è  
sopra la nuova struttura  
21-6-65*  
*D. Baranali*

Figura 5: lettera della Segreteria Generale del CNEN del 18 giugno 1965



**Figura 6:** Alvaro Palamidessi dentro lo schermo del TAPIRO



**Figura 7:** completamento della struttura della sala reattore.



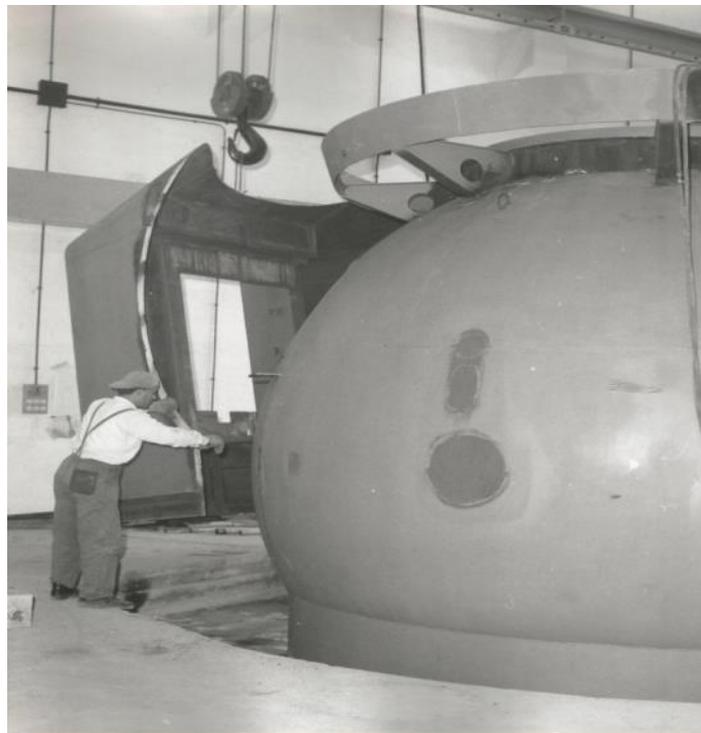
**Figura 8:** il montaggio del contenitore sotto-pila nel giugno '68



**Figura 9:** il canale verticale e l'involucro del riflettore collegati con il contenitore del sotto-pila (agosto '68)



**Figura 10:** il montaggio della carpenteria del blocco pila nell' ottobre del '68



**Figura 11:** il montaggio del naso della colonna termica (ottobre '68)



**Figura 12:** la consolle di controllo del Tapiro in allestimento nel settembre '68 con Tarantini e Mazza



**Figura 13:** il contenitore dei rivelatori di flusso installato nel dicembre '68.



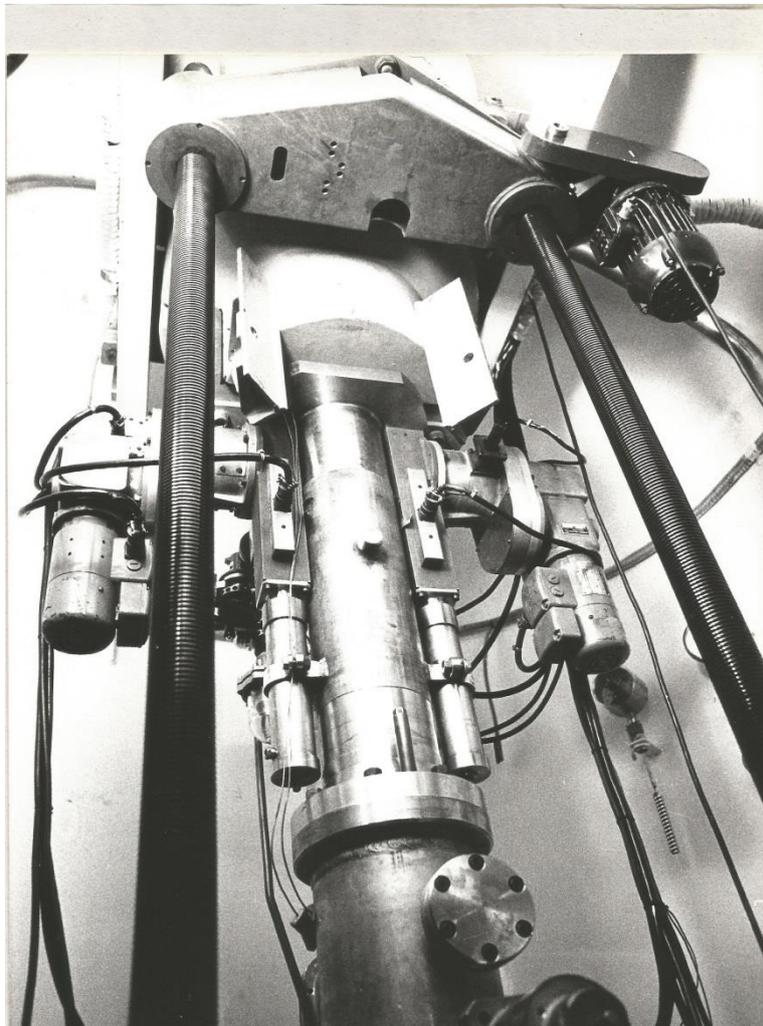
**Figura 14:** una prova della strumentazione. Da sinistra Tarantini, Musso, Palamidessi, Mazza, Santangelo e Di Bartolo (dicembre '69).



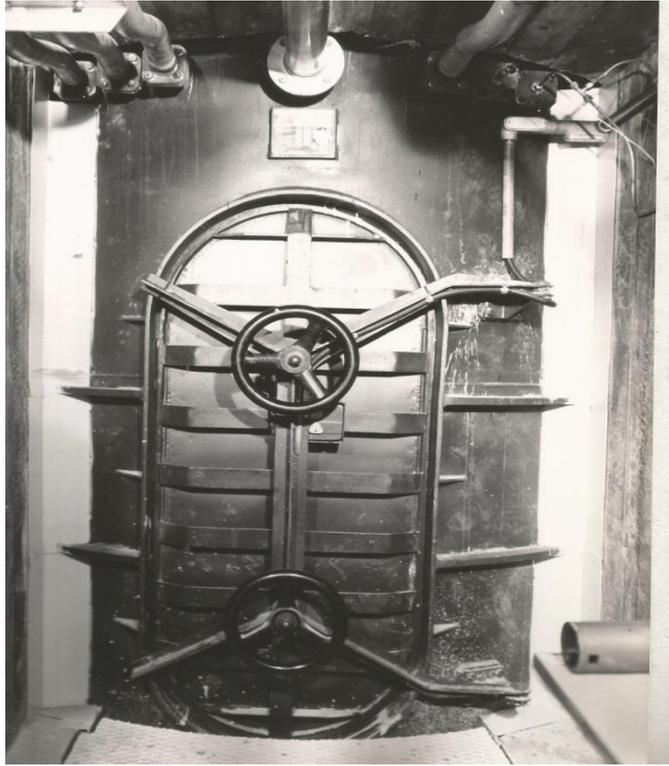
**Figura 15:** l'allestimento della colonna termica (dicembre '70)



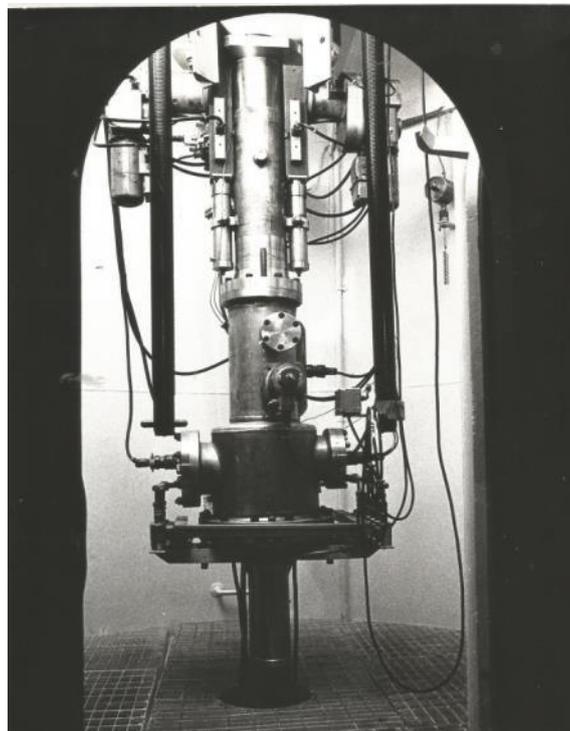
**Figura 16:** la colonna termica completata (gennaio '71)



**Figura 17:** l' interno del sotto pila (gennaio '71)



**Figura 18:** il portello di accesso al sotto-pila (gennaio '71)



**Figura 19:** il meccanismo del tappo di sicurezza (gennaio '71)



**Figura 20:** la sala controllo nel febbraio '71



**Figura 21:** l'edificio reattore nell'aprile del '71

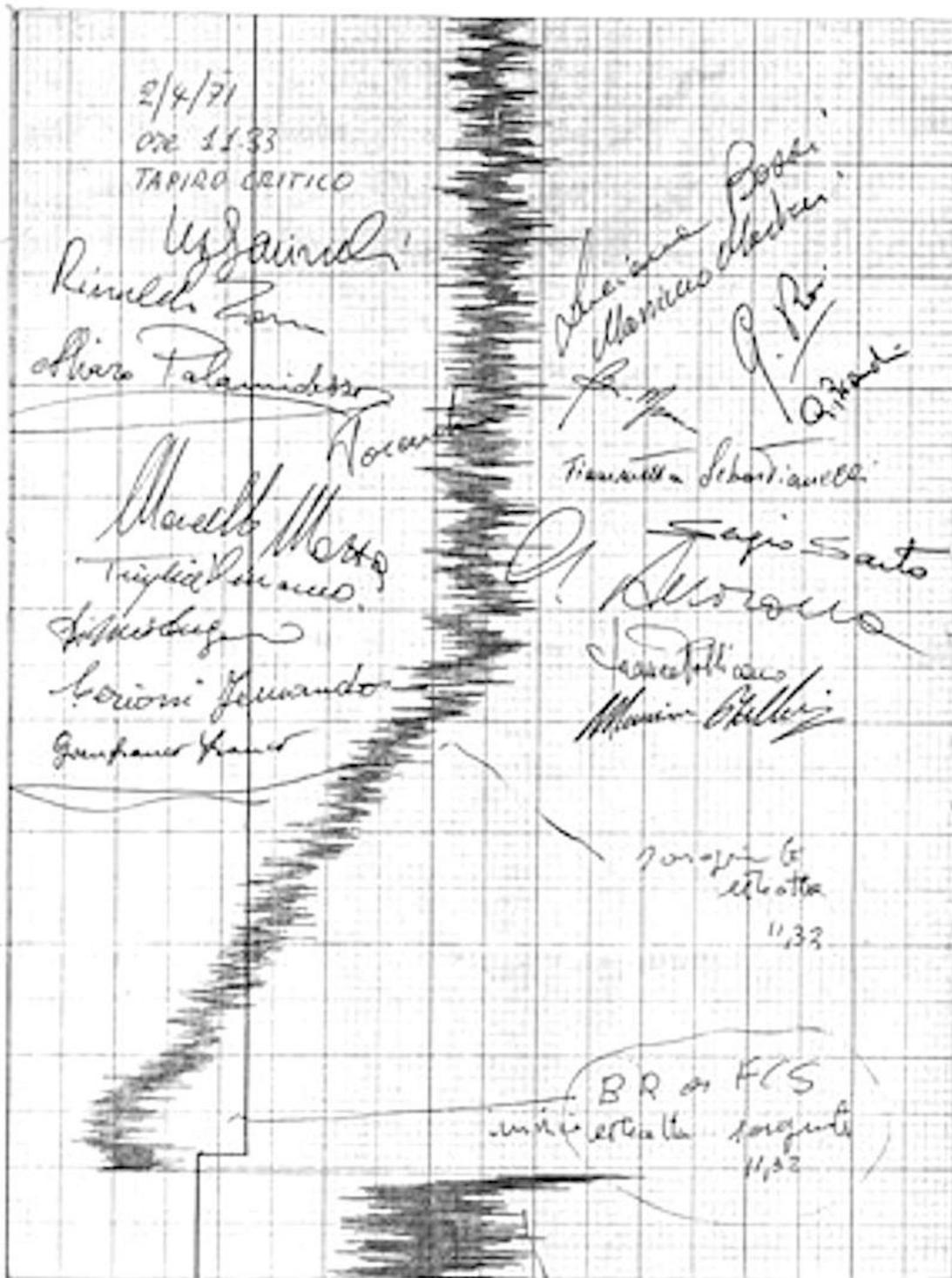
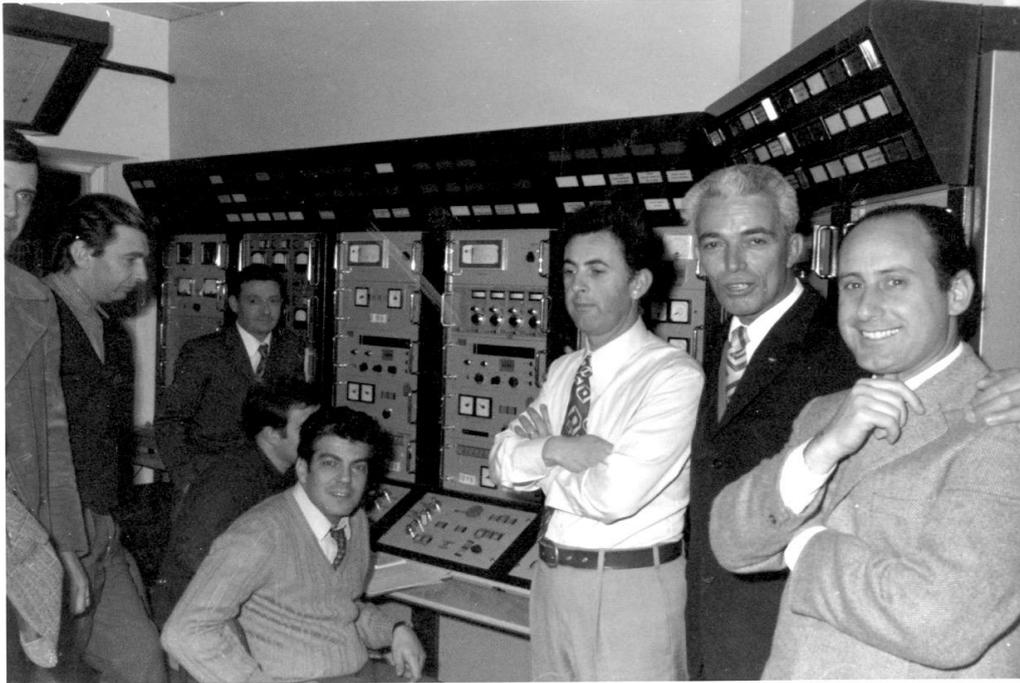


Figura 22: 2 aprile 1971 ore 11:33 tracciato del registratore del flusso neutronico (canale lineare n°1)



**Figura 23:** 2 aprile 1971 da destra Bianchi, Franco (Direttore del Centro), Accorona, Tarantini e Rosi alla consolle, Di Modugno, Farinelli durante l'esperimento critico



**Figura 24:** 2 aprile 1971 Sala controllo, da destra Accorona e Rosi alla consolle. Di Modugno, Mazza e Zona durante un intervallo dell'esperimento critico



Figura 25: 2 aprile 1971 da destra Fiammetta Sebastianelli alla consolle e Zona dopo l'esperimento critico

29

Mis. 20 conteggi - CPI - 30 sec -  $\bar{C} = 3774.6$   
 3842, 3711, 3771, 3789, 3760 -  $\bar{C} = 3774.6$   
 CP2 - 30 sec -  
 3944, 3888, 3949, 4007, 3979 -  $\bar{C} = 3953.4$

11.05 Mis. 2. BR a 60 mm -  
 Mis. 20 conteggi - CPI - 30 sec -  
 4717, 4748, 4609, 4788, 4764 -  $\bar{C} = 4725.25$   
 CP2 - 30 sec -  
 4866, 4868, 4844, 4927, 4864 -  $\bar{C} = 4873.65$

11.12 Mis. 2. BR a 80 mm -  
 Mis. 20 conteggi - CPI - 30 sec -  
 7119, 6895, 7029, 6946, 7017 -  $\bar{C} = 233.37$  cps.  
 CP2 - 30 sec -  
 7151, 7230, 7098, 7025, 7262 -  $\bar{C} = 238.44$  cps.

11.19 Mis. 2. BR a 100 mm -  
 Mis. 20 conteggi - CPI - 30 sec -  
 14629, 15095, 15034, 15223, 15459, 15397, 15689 -  
 CP2 - 30 sec -  $\bar{C} = 520$  cps.  
 15051, 15587, 15607, 15906, 16298, 15995, 16321 -  
 $\bar{C} = 592$  cps.

11.30 Mis. 2. BR

11.31 Rimozione sorpetti - Mis. 2 BR a F.C.S.  
 Reattore sopra critico - Si stabilizza e  
 con la BR -

11.45 Potenza stabile - BR: 132.4 mm -

11.46 Estrazione BR a F.C.I. Si riprende la  
 direzione -

11.51 Mis. 2. BR a F.C.S. Mis. 2 di periodo I°  
 [Periodo: 165 sec.]

12.07 Estr. 2. BR. Si scende fino a F.S.  
 molto basso.

12.12 Mis. 2. BR a 120 mm - La potenza II°  
 stabile ~ linearmente - Si prendono conteggi -

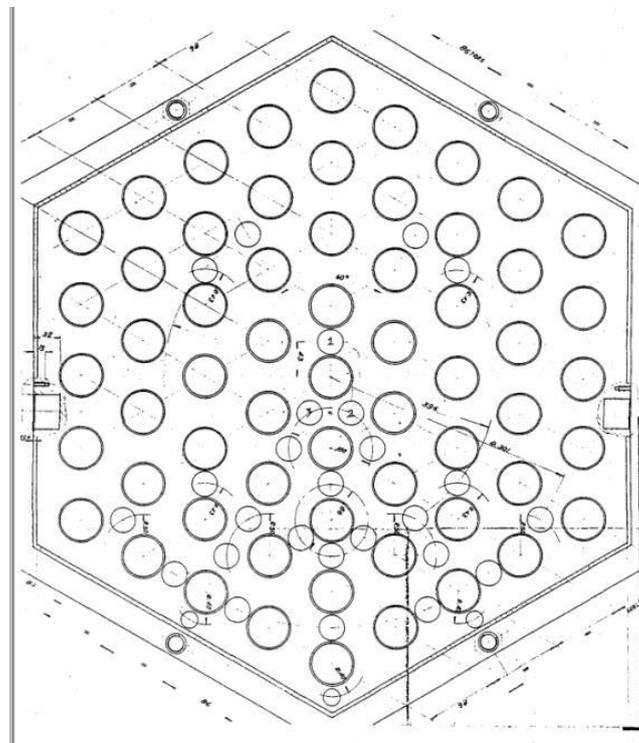
12.28 Estrazione BR a 110 mm -  
 La potenza scende -

Figura 26: Pagina del Registro di Operazione con la criticità del TAPIRO

(2a parte)



**Figura 27:** operazione sul Canale Diametrale e prova di tenuta He



**Figura 28:** mock-up della griglia del PEC

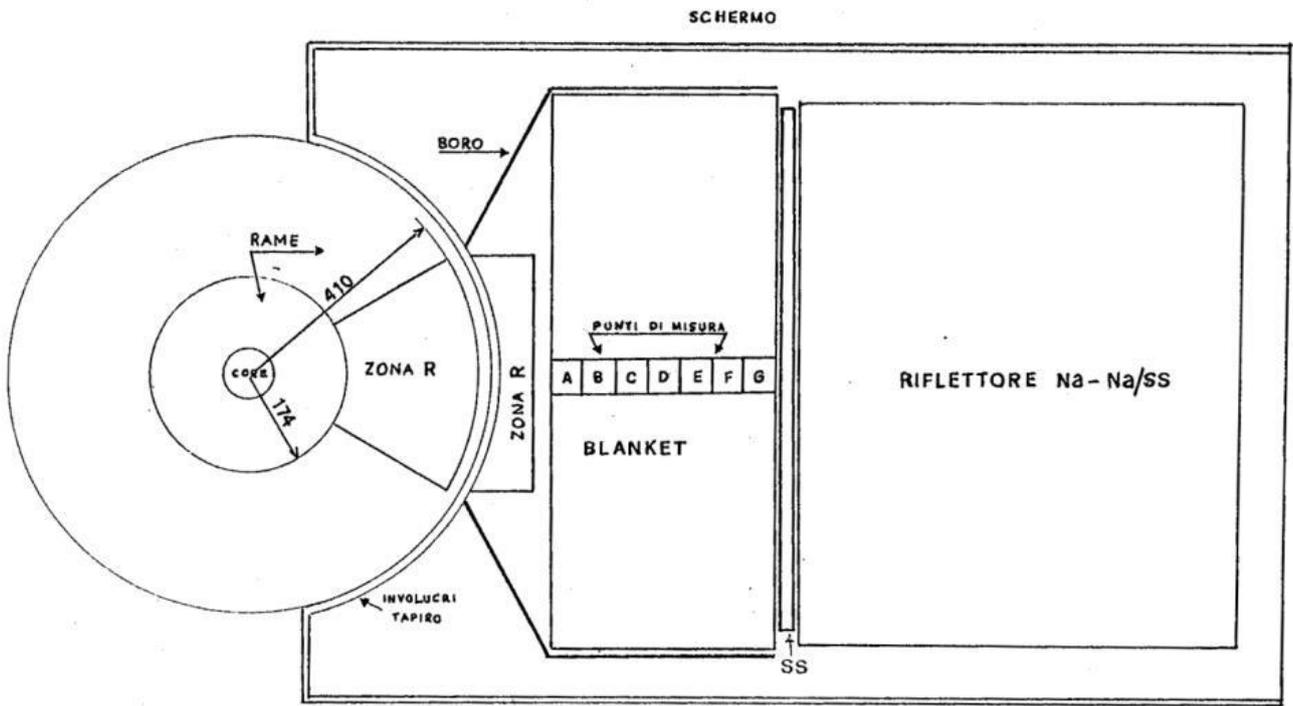


Figura 29: sezione orizzontale della zona di irraggiamento per l'esperienza NEFERTITI

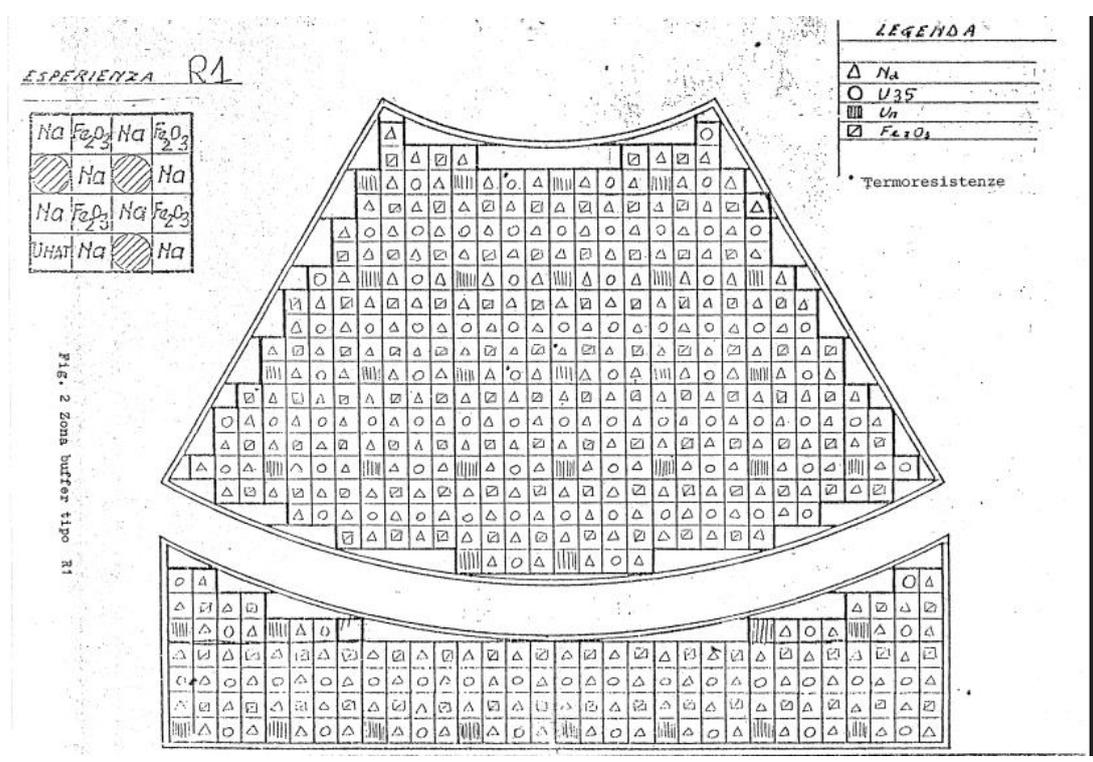


Figura 30: dettaglio della zona della zona di irraggiamento per l'esperienza NEFERTITI



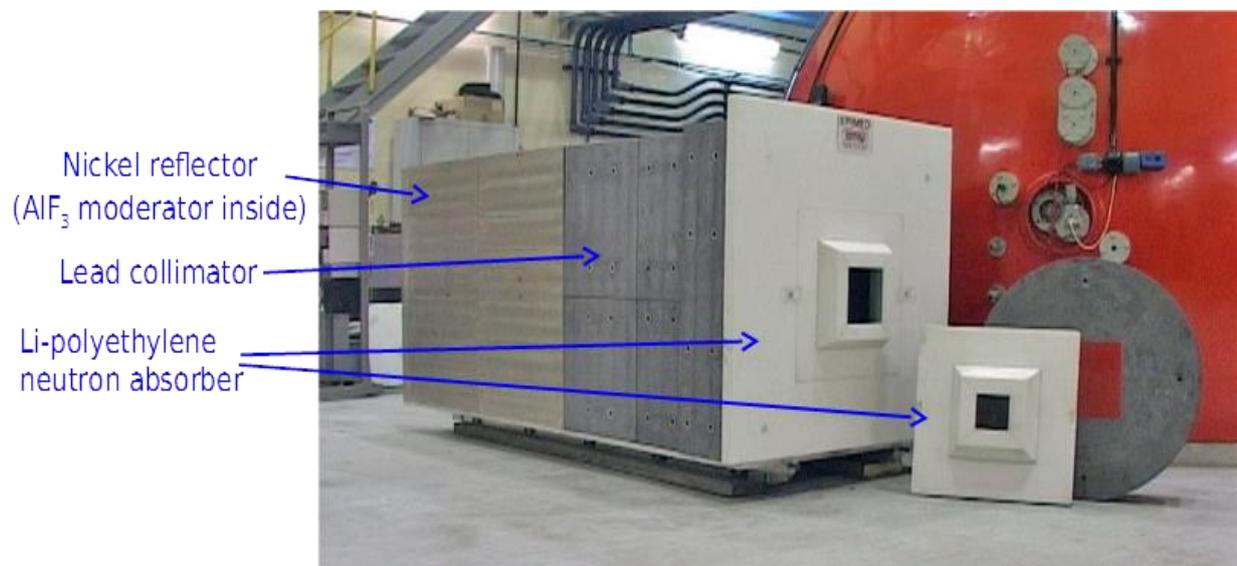
**Figura 31:** 1985 – Operazione a consolle. Da sinistra: Antonio Perrone, Giancarlo Rosi



**Figura 32:** vano di irraggiamento in colonna termica per animali da laboratorio



**Figura 33:** sala reattore. complesso con i materiali di schermaggio del vano di irraggiamento all'uscita del collimatore della facility sperimentale BNCT



**Figura 34:** colonna EPIMED assemblata nella sala reattore del TAPIRO



Figura 35: colonna EPIMED all'interno del vano colonna termica del TAPIRO

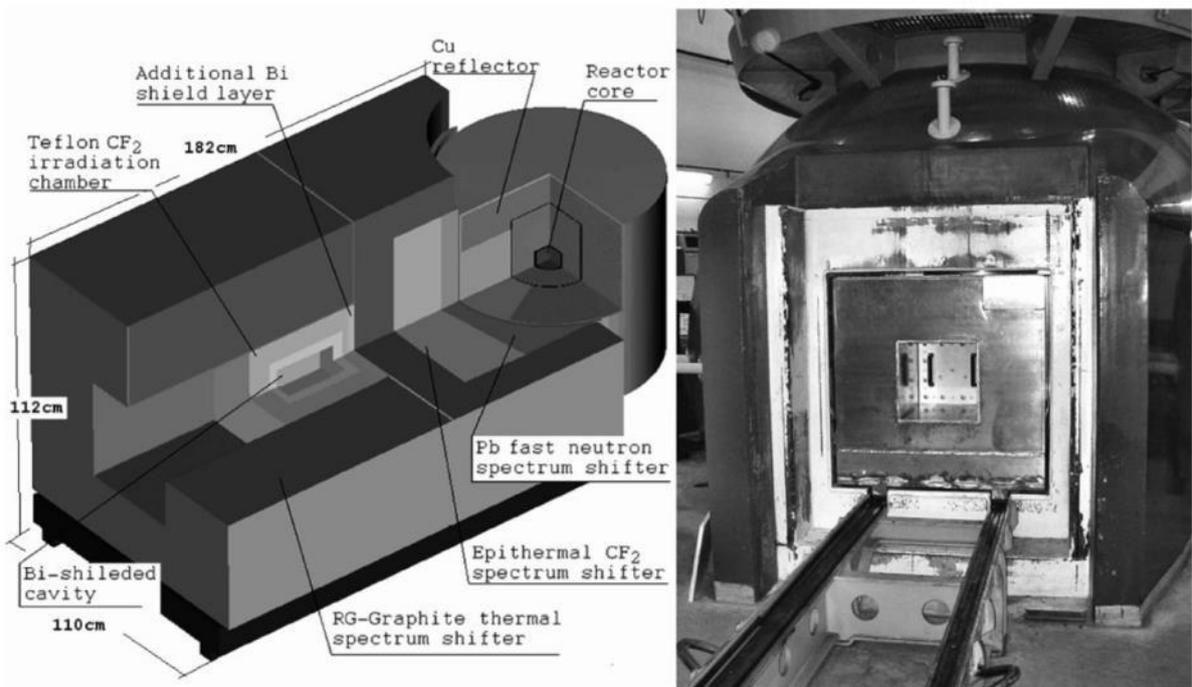


Figura 36: colonna epitermica HYTHOR



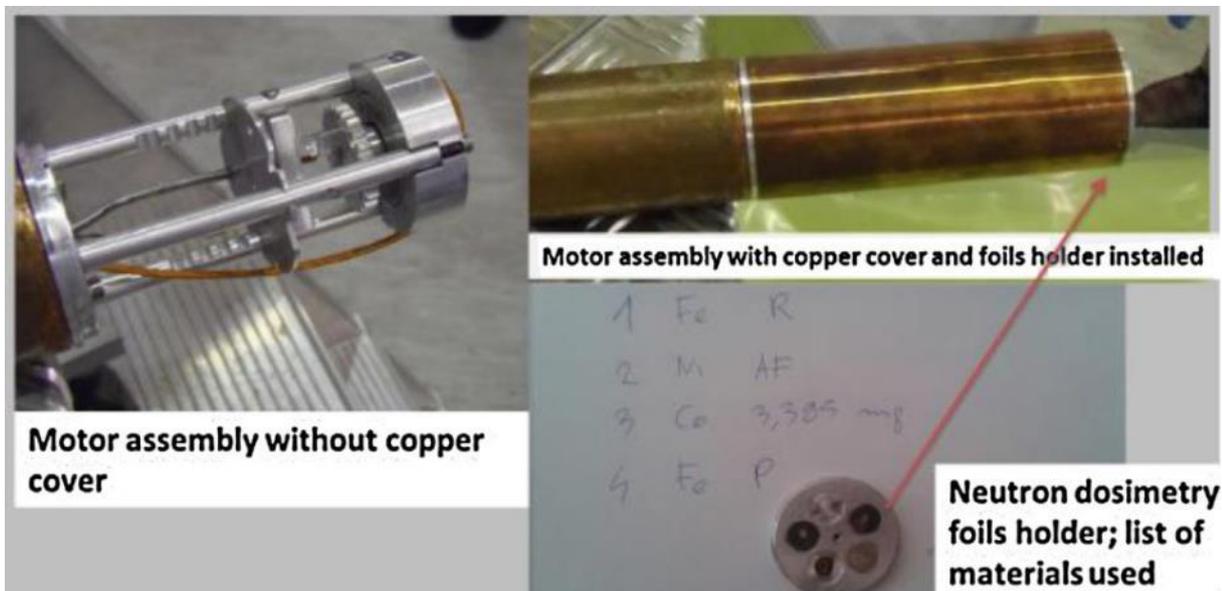
**Figura 37:** foto di alcuni dei partecipanti all'incontro dei Tapiri del 2004. Da destra Brunori, Musso, Santangelo, Zona, Celentano, Farinelli, Mazza, Di Modugno, Festinesi



**Figura 38:** foto di alcuni dei partecipanti all'incontro dei Tapiri del 2004. Da destra Rosi, Accorona, Renieri, Di Modugno, Mazza, Brunori, Celentano, Musso, Santangelo, Zona, Farinelli



**Figura 39:** foto del gruppo di esercizio dell'impianto TAPIRO scattata il 31/05/2016. Da destra Alfonso Santagata, Barbara Bianchi, Orlando Fiorani, Pierpaolo Ricci, Matteo Cesaroni e Antonino Ratto



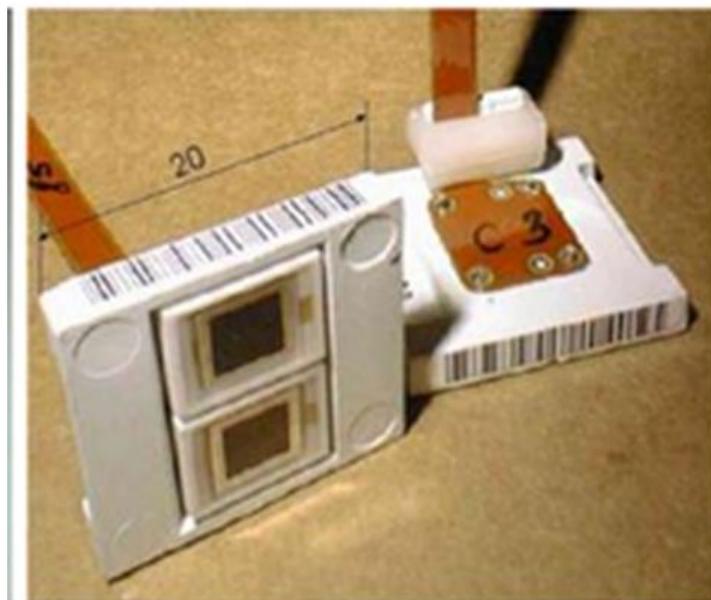
**Figura 40:** assemblaggio del motorino ceramico nel canale radiale 1



**Figura 41:** 3 campioni d'acciaio con rispettivi rivestimenti ed intensità del flusso neutronico



**Figura 42:** fotodiodi Hamamatsu e segmenti di fibra ottica in quarzo



**Figura 43:** Capsule con APD irraggiate nel canale radiale 1



**Figura 44:** foto del gruppo di esercizio dell'impianto TAPIRO scattata il 29/10/2020. Da destra Barbara Bianchi, Alfonso Santagata, Luca Falconi, Matteo Cesaroni e Pierpaolo Ricci

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
ottobre 2021