

Il bruciamento delle scorie nucleari: le sfide tecnologiche e i programmi in corso



Paolo Pierini

INFN Milano LASA

Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata

**Work supported by the EURATOM
6° framework program of the EC,
under contract FI6W-CT-2004-516520**

- **Le problematiche del ciclo attuale del combustibile nucleare**
 - scorie
 - disponibilità delle risorse
- **La Generation IV, gli ADS e i depositi geologici**
 - opportunità di individuare soluzioni miste per raggiungere un ciclo del combustibile nucleare chiuso e sostenibile
- **I programmi europei sugli ADS**
- **Le principali problematiche tecnologiche da affrontare**

fonti “essenziali”

The European Technical Working Group on ADS



A European Roadmap for Developing
Accelerator Driven Systems (ADS)
for Nuclear Waste Incineration

+ Deliverable contrattuali
programmi CE

5PQ, 6 PQ

April 2001

GIF-002-00

A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems

December 2002

Ten Nations Preparing Today for Tomorrow's Energy Needs

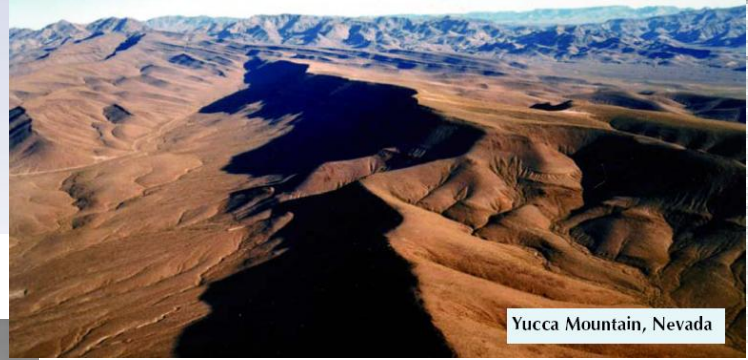
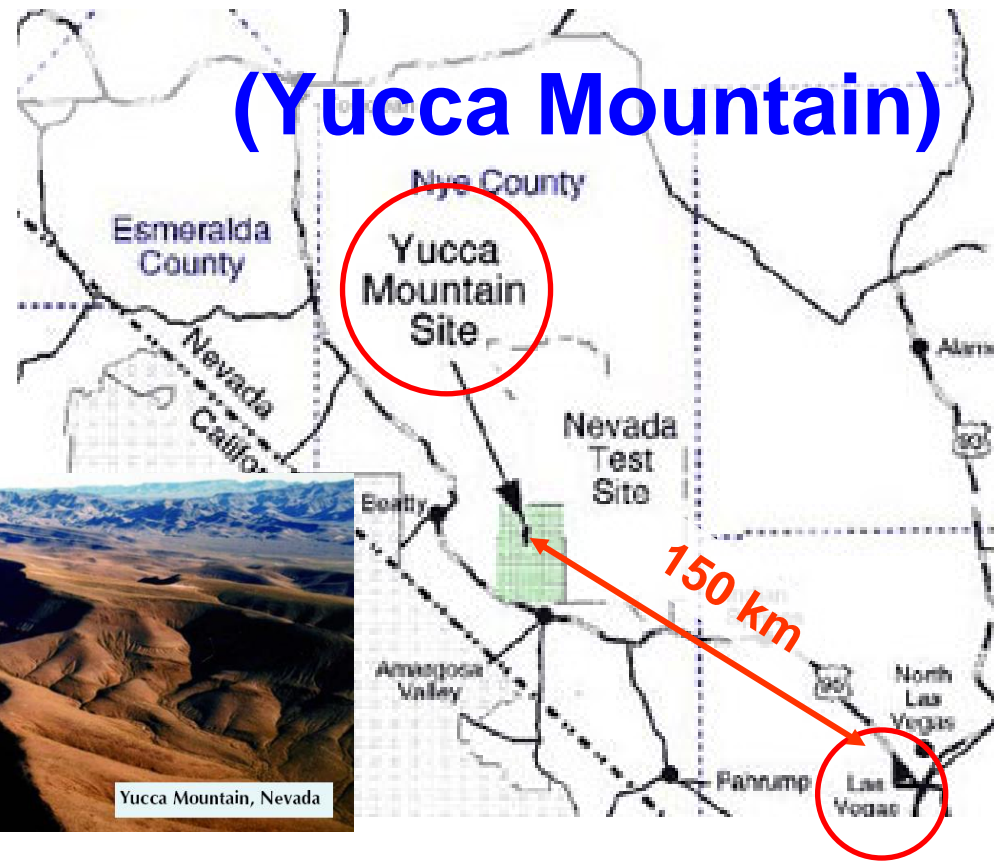
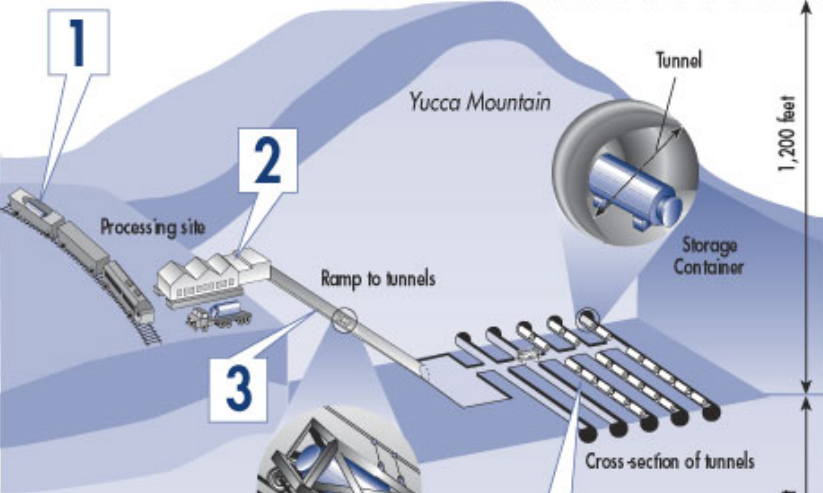


Issued by the
U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee
and the Generation IV International Forum

03-GA60034

il problema

- Cosa fare delle scorie prodotte dai reattori nucleari
 - **Scenario Europeo (Dati del 2001, ETWG on ADS):**
 - 145 reattori,
 - 125 GWe,
 - Produzione annuale di 850 TWh (circa il 35%)
 - Produzione annuale di 2500 tonnellate di combustibile esausto
 - Produzione annuale 25 tonnellate di Pu
 - Occorre **minimizzare il volume e il carico termico** dei “rifiuti” inviati allo stoccaggio geologico
 - Occorre **ridurre la radiotossicità** delle scorie
- Pochi paesi hanno iniziato o anche solo approvato la costruzione di un deposito
 - Es. USA: Yucca Mountain in Nevada, già potenzialmente pieno, ma non ancora utilizzato per lo stoccaggio



Ad oggi (Physics Today, Maggio 2006 p 25):

- 55000 tonnellate in 100 depositi temporanei (39 stati)
- 2000 tonnellate prodotte ogni anno in USA
- 70000 tonnellate la capacità prevista del deposito (già quasi pieno!)

Per il licensing richiesta analisi per sicurezza dopo 1 000 000 anni... (dopo che Congresso ha bocciato analisi per 10 000)

una possibile strategia

- Partitioning & Transmutation

- Separazione chimica ad elevata precisione

- Separazione del Pu, degli attinidi (MA), e dei frammenti di fissione a lunga vita (LLFF)

- Assemblaggio delle scorie in nuovi elementi di combustibile

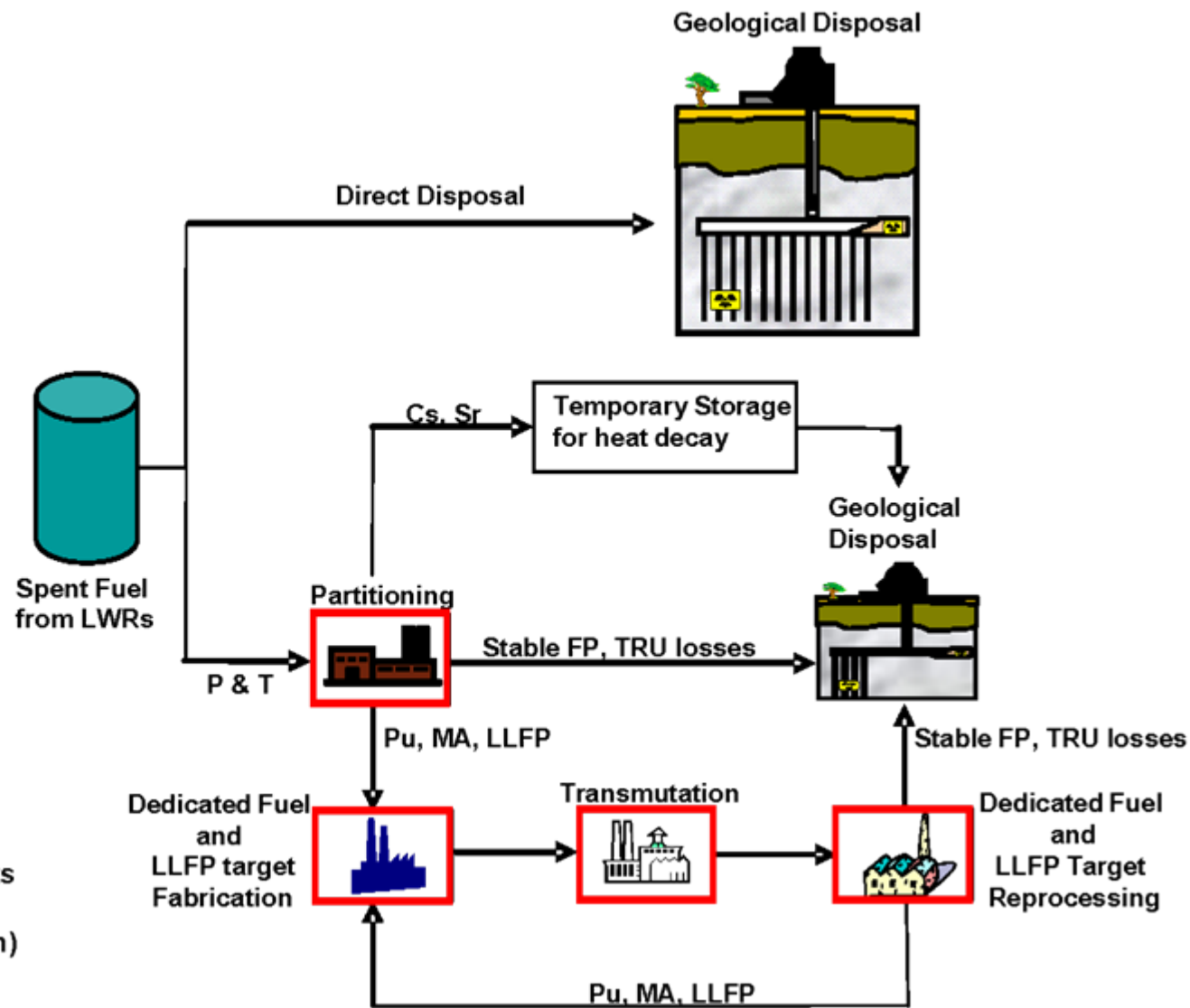
- Trasmutazione del Pu, MA, FF

- utilizzati come combustibile in **sistemi dedicati** (reattori sottocritici con spettro veloce di neutroni, con sorgente esterna per spallazione...ma anche in reattori critici veloci)

- il **resto** del combustibile esausto dopo il partitioning e i residui dopo l'utilizzo nel trasmutatore possono essere mandati nei depositi geologici

- strategia sinergica con quella della creazione di depositi geologici, ma di ridotte dimensioni e con requisiti di durata inferiore (licensing!)
 - NON è una strategia che propone di eliminare di depositi geologici

Strategia separazione e trasmutazione



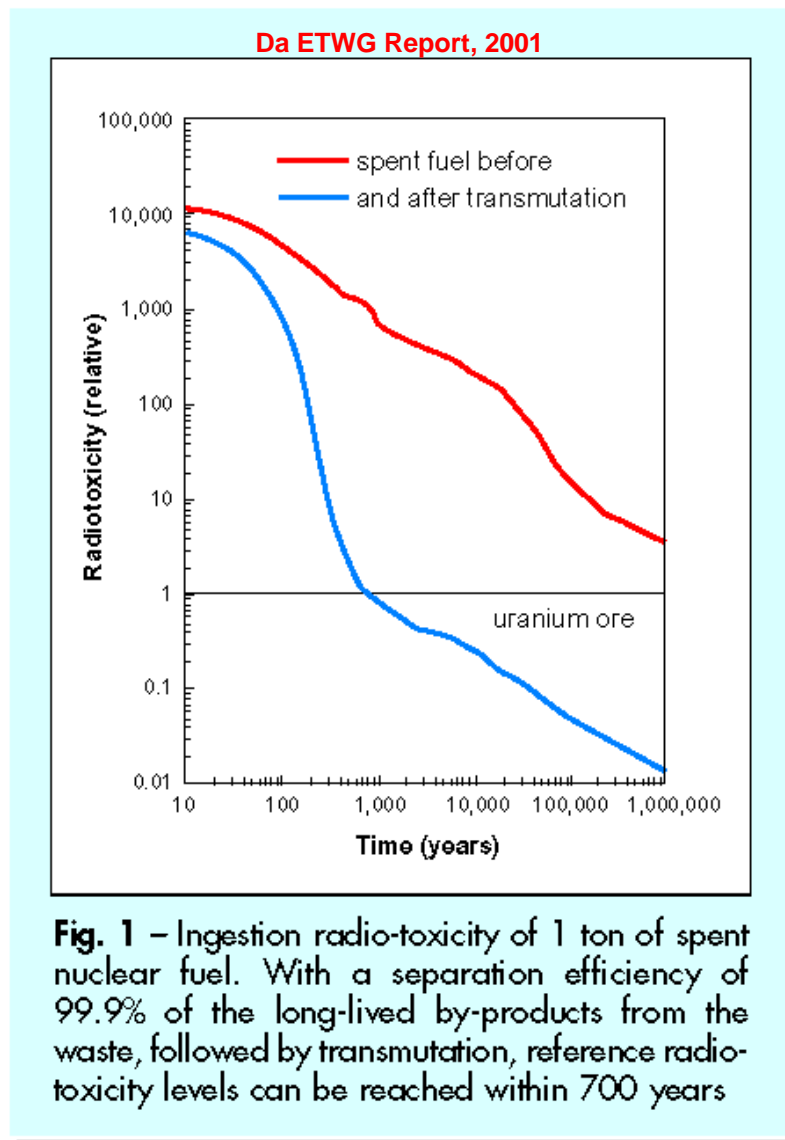
LLFP: Long lived fission products (Tc-99, I-129, Se-79, ...)
 MA: Minor Actinides (Am, Np, Cm)

una possibile soluzione

- Il sistema per realizzare questa strategia ha bisogno di due ingredienti principali
 - Un **reattore sottocritico** ($k < 1$), possibilmente con combustibile senza U
 - La reazione a catena non è autosostenuta, necessita di una sorgente esterna
 - a sicurezza “intrinseca” (si interrompe la sorgente)
 - Una sorgente intensa di **neutroni per spallazione**
 - Ovvero un fascio intenso di protoni incidente su un bersaglio di metallo (liquido per questioni di densità di potenza)
 - parecchi MW (da 3 a 20, secondo gli scenari) di potenza di fascio sul target di spallazione
 - Fornisce i neutroni mancanti che alimentano la reazione
 - Garantisce uno spettro largo di energia del flusso neutronico (per un efficace tasso di fissione anche sui MA)

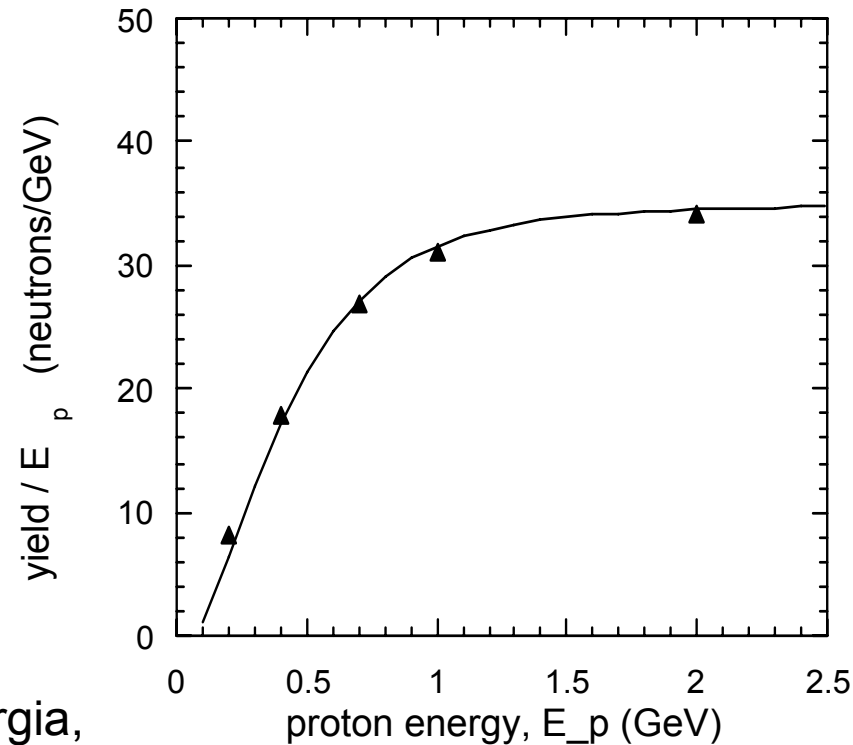
gli obiettivi della strategia di P&T

- La **radiotossicità** del combustibile esausto si riduce a quella del materiale di partenza (uranium ore) dopo periodi superiori a 10^6 anni
 - Per non contaminare la biosfera è necessario sistemarli in depositi geologici profondi che siano stabili per questi tempi
 - *Pesante eredità per il futuro*
- **La separazione chimica** (Partitioning) e l'**irraggiamento in un flusso di neutroni veloce e intenso** in sistemi ADS (Transmutation) può ridurre questo tempo a 700-1000 anni



caratteristiche del fascio di protoni

- Alta frequenza di ripetizione (meglio, **fascio continuo**)
- energia dell'ordine di **1 GeV**, determinata da
 - *rate di produzione dei neutroni, per GeV e per protone*
 - saturazione a ~ 1 GeV
 - *energia dissipata nel target di spallazione*
 - decresce rapidamente con l'energia, per $E < \text{qualche GeV}$
- potenze di fascio comprese tra qualche MW e qualche decina di MW
 - alcuni MW per un sistema “dimostrativo” < 100 MWth
 - fino a 30 MW per una scala industriale da ~ 1500 MWth



P&T: concetto non unico

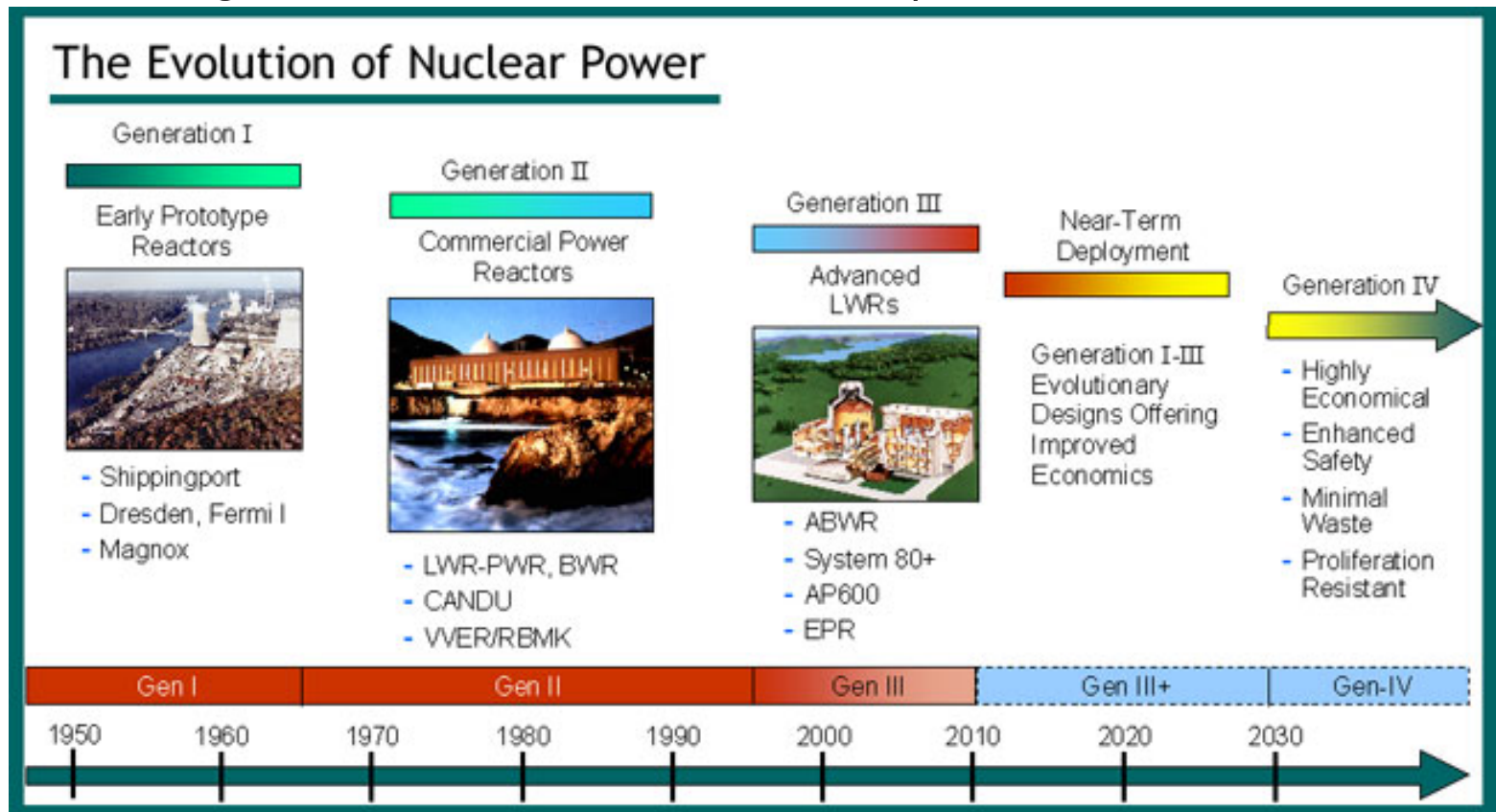
- Sugli scenari di P&T pesano **scelte degli Stati Nazionali** per quanto riguarda le **politiche nucleari**
 - Francia e Giappone considerano il **Pu** contenuto nelle scorie degli LWR come **risorsa da sfruttare**
 - Le scorie vengono riprocessate,
 - il Pu separato e mescolato all'U per creare combustibile a ossidi misti (MOX) da utilizzare in reattori termici
 - Il rimanente (MA, FP) viene inviato ai depositi geologici
 - Altri paesi (Svezia, USA) considerano tutto il combustibile esausto come scoria, non lo riprocessano e lo inviano ai depositi
 - Strategia mirata alla non proliferazione da parte del ciclo civile di materiale che possa essere utilizzato per armi nucleari
- Le differenti politiche vengono mantenute anche nell'approccio al P&T

scorie in reattori critici o ADS?

- Le scorie possono essere riciclate e trasmutate anche nei **reattori critici**, senza separare Pu e MA
 - qualche volta negli LWR, poi accumulo TRU
 - nei veloci TRU non si accumulano
- Gli **ADS**, che richiedono una sorgente di neutroni esterna, sono più “versatili” e si prestano a **tassi di smaltimento degli attinidi molto più elevati**
- In pratica (semplificando), *non dovendo sottostare a condizioni di criticità*, **in un ADS è possibile far funzionare il reattore con una composizione qualsiasi di combustibile (o quasi), regolando il flusso esterno fornito dall’acceleratore per garantire il tasso di trasmutazione**

sinergia con Gen IV

- La Generazione IV dei reattori, da iniziare a distribuire “commercialmente” nel 2030 prevede (tra l’altro) una “**chiusura del ciclo**” con produzione minima di scorie (che vengono bruciate nel reattore)



GEN IV International Forum

- **Missione:**
 - Generazione energia
 - Produzione idrogeno
 - Produzione calore
 - Gestione dei MA

The Generation IV International Forum (GIF) Generation IV Technology Press Room What's New

GEN IV International Forum™
Preparing Today for Tomorrow's Energy Needs

The Generation IV International Forum, or GIF, was chartered in July 2001 to lead the collaborative efforts of the world's leading nuclear technology nations to develop next generation nuclear energy systems to meet the world's future energy needs.

This unique international effort reached a major milestone in 2005 when five of the forum's member countries signed the world's first agreement aimed at the international development of advanced nuclear energy systems.

The nine GIF founding members were joined by Switzerland in 2002, Euratom in 2003 and most recently by China and Russia at the end of 2006.

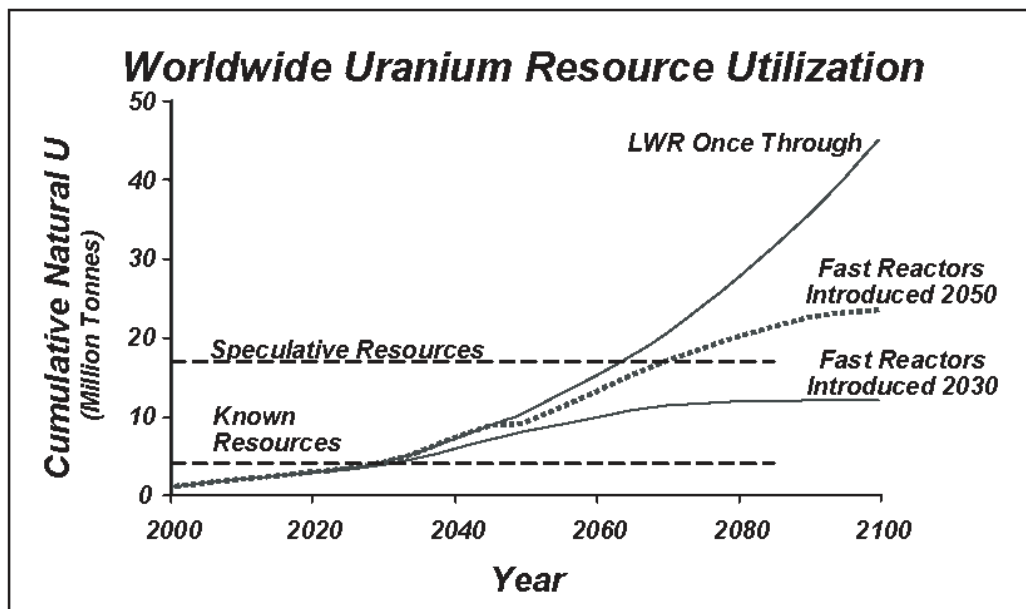
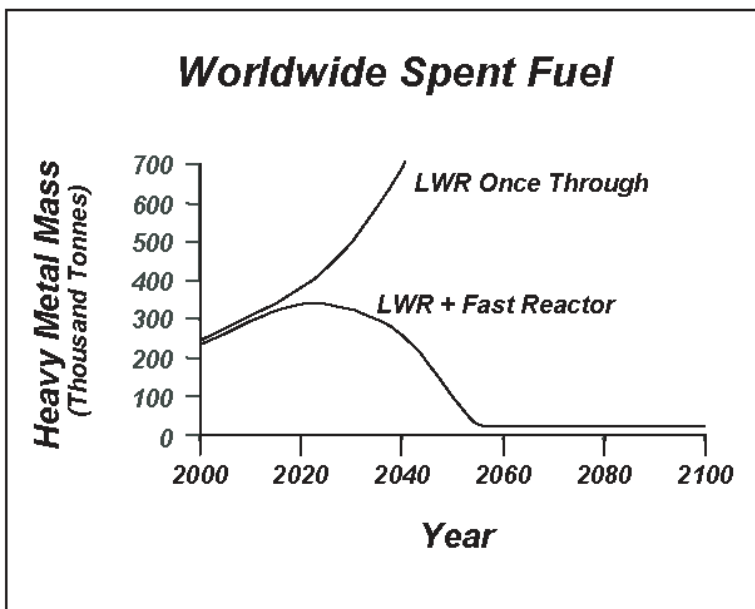
Copyright OECD Nuclear Energy Agency AEA

- 6 sistemi candidati
 - 3 reattori veloci
 - 3 reattori termici

- **Sostenibilità**
 - produzione sostenibile
 - disponibilità per lunghi tempi
 - minimizzazione/gestione scorie
- **Economia**
 - competitività con altri sistemi
 - riduzione rischi finanziari
- **Sicurezza e Affidabilità**
 - eccellenza
 - minima probabilità danno core
 - elimina procedure emergenza esterne
- **Proliferazione**
 - protezione terrorismo
 - controllo materiale utilizzabile per armi

il problema delle risorse

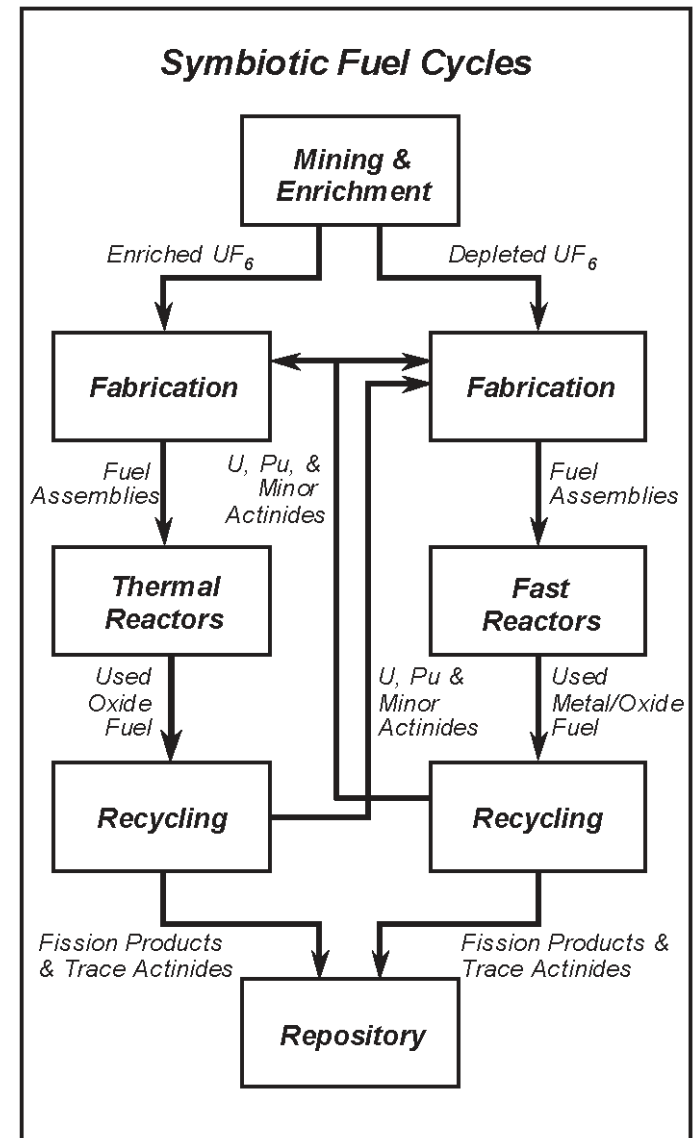
Da GIF Report, 2002



- Il ciclo attuale “aperto” comunque è problematico non solo per l’accumulo delle scorie, ma anche per lo **sfruttamento delle risorse** (U naturale)
- Le risorse correnti potrebbero esaurirsi entro il 2030, ulteriori giacimenti da sfruttare potrebbero consentire di prolungare fino a metà secolo circa

ciclo “simbiotico” GEN IV

- In GEN IV 6 differenti tipi di reattori convivono simbioticamente,
 - **Veloci**: Gas (GFR), Piombo (LFR), Sodio (SFR)
 - **Termici**: Sali fusi (MSR), Supercritici (SCWR), Alta temperatura (VHTR)
- Differenti **specializzazioni** (500-1000°C)
 - Generazione di energia [SCWR, SFR]
 - Generazione di idrogeno [VHTR]
- Differenti **taglie**
 - Grandi: LFR, MSR, SFR, SCWR
 - Medi: GFR, VHTR, SFR
 - Piccoli: LFR
- Differenti **cicli** combustibile
 - A singolo passaggio: VHTR
 - Smaltimenti attinidi: gli altri



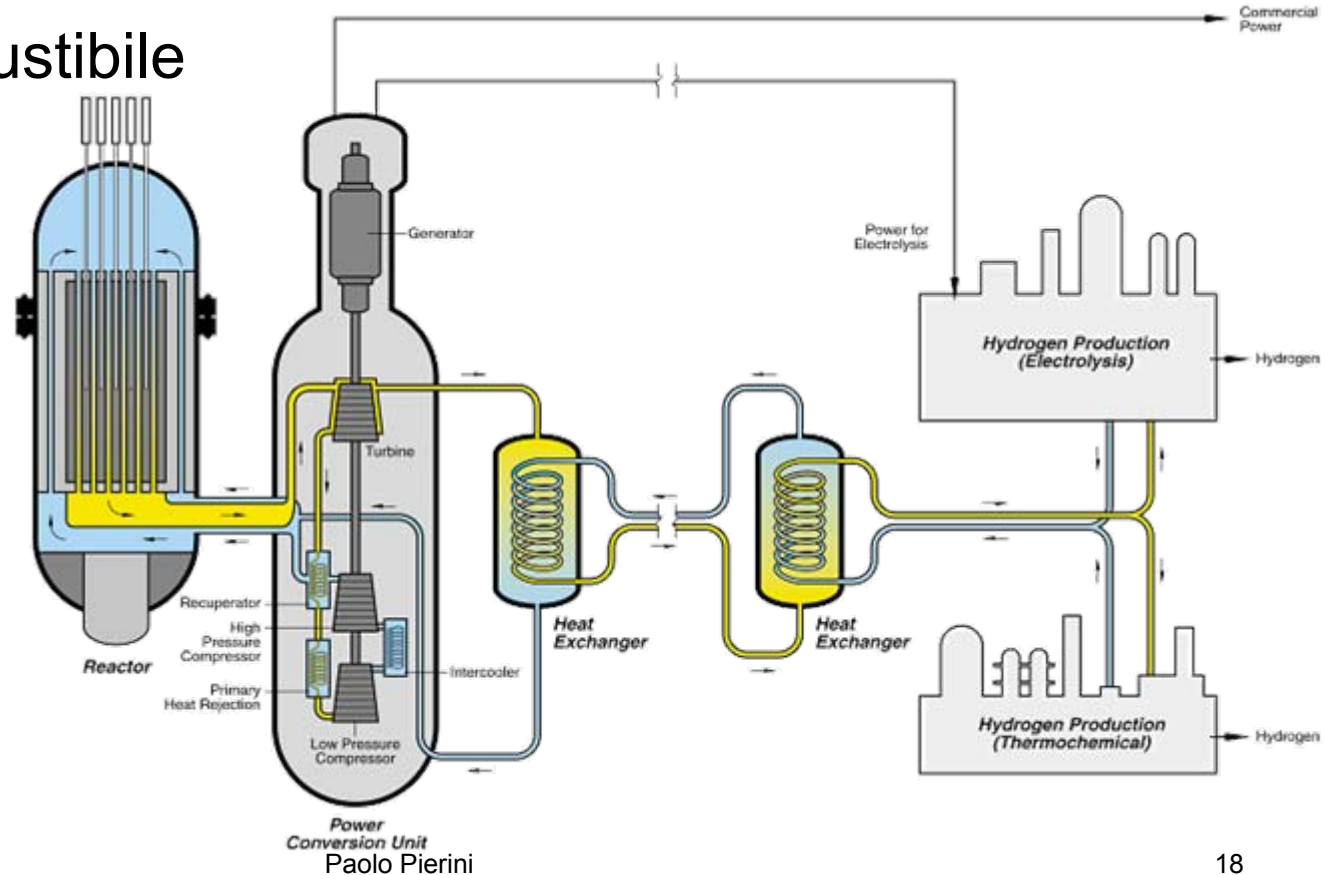
Da GIF Report, 2002

smaltimento Pu e MA in GEN IV

- Nel ciclo GEN IV il **Pu non viene separato dagli attinidi** (per ovvio rischio di proliferazione), ma entrambi vengono utilizzati per creare elementi di combustibile per i reattori veloci
- Nei reattori veloci, grazie al differente rapporto tra assorbimento e fissione
 - Maggiore utilizzo dell'U
 - Utilizzo di attinidi come combustibile
- All'interno del ciclo simbiotico il sistema è in grado di “tollerare” dei *reattori termici a passaggio singolo*, ma con **elevata specializzazione**
 - I reattori ad alta temperatura VHTR (1000°C) dedicati alla produzione di idrogeno

esempio di specializzazione: VHTR

- Temperatura di uscita 800-1000 °C
- Unica opzione per il raffreddamento
 - Raffreddati a He Gas
 - Problema degli scambiatori di calore
- Nuovo combustibile



- GEN IV offre le prospettive per riavviare **un ciclo nucleare maggiormente sostenibile** sia dal punto di vista delle **risorse** che dell'impatto in termini di **scorie da inviare ai depositi**
- *Ma in un mercato sempre più liberalizzato che deve fare fronte alla ECONOMICITA' non è detto sia ragionevole ipotizzare che le utility energetiche possano farsi carico dello smaltimento delle scorie risultanti da 50 anni di ciclo a singolo passaggio*
- E' possibile cioè che la transizione al nuovo ciclo promesso da GEN IV *debba passare attraverso una fase intermedia per lo smaltimento ad-hoc* delle scorie accumulate finora
 - *Questione dibattuta: quanti anni di transizione? 20 o 100?*

- Potrebbe quindi essere opportuno disporre di sistemi specializzati, ad-hoc, per il **riprocessamento e lo smaltimento delle scorie esistenti**, che non interferiscano con le infrastrutture che verranno realizzate per il parco di reattori GEN IV
 - Minimizzando i **trasporti** di combustibile esausto o scorie, che sono socialmente poco accettati
- Pochi “**bruciatori**”, di tipo ADS, per gestire la fase di transizione ed eventualmente a supporto del nuovo ciclo per una maggiore riduzione dell’inventario di scorie da inviare nei depositi geologici
- *Come al solito, non esiste una soluzione unica, la migliore strategia combina tutti gli ingredienti*
 - *Nuova generazione (veloci e termici), ADS e depositi geologici*

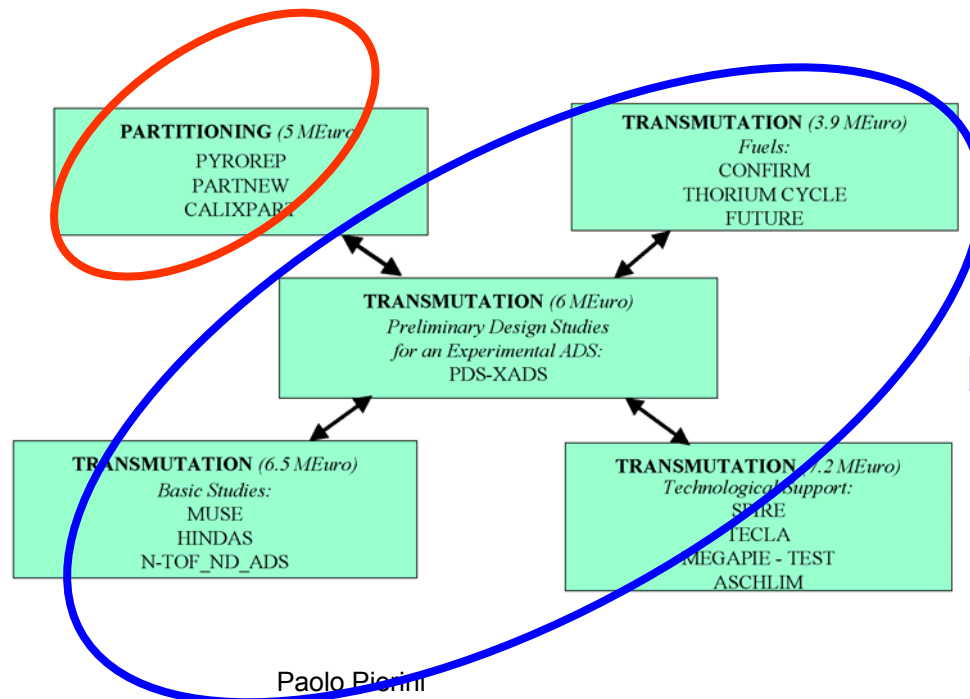
il ruolo della politica regionale

- **Le scelte politiche nazionali interferiscono pesantemente con la missione di GEN IV**
 - strategie di gestione del combustibile esausto e delle scorie
 - grosse differenze nazionali
 - (es. USA, dal 70 con amministrazione Carter nessun riprocessamento)
- **Conseguenza**
 - difficile tenere conto dei fattori esterni regolati dalle scelte politiche nazionali in un quadro di economicità oggettivo
 - *...the market environment for these systems is not yet well defined, and their required economic performance in the near term will be likely be determined by the governments that deploy them*
 - Dal GenIV International Forum

il sistema Europa

- EURATOM è attivo fin dal 5 Programma Quadro (Post-ETWG Rubbia 2001) in programmi dedicati al P&T
- In FP5 network di programmi, dedicati alle tecnologie per il Partitioning (separazione chimica ad elevata purezza degli attinidi) e la Trasmutazione
- In FP6 raggruppati in due strumenti: EUROTRANS e EUROPART

EUROPART



EUROTRANS

In Italia attività MURST
ENEA-INFN dal 1998 al
2003

Programma **TRASCO**
TRAsmutazione SCOrie
LASA ruolo importante



31 Enti e industrie

16 Università associate in ENEN



EUROTRANS EUROPEAN RESEARCH PROGRAMME FOR THE TRANSMUTATION OF HIGH LEVEL NUCLEAR WASTE IN AN ACCELERATOR DRIVEN SYSTEM

nel 6° Programma Quadro della CE (2005-2008)
Prosegue il programma PDS-XADS (2001-2004) del 5° PQ



sforzo CE origina da programmi nazionali (es. MURST
TRASCO 1998-2003 e programmi francesi)



budget in 4 anni di 42.3 M€ (23 M€ da fondi EU)

obiettivi di EUROTRANS

- Procedere verso la definizione di una strategia per una **European Transmutation Demonstration** (ETD) attraverso la definizione di
- Un progetto avanzato per una **facility sperimentale** (da 50 a 100 MWth) per la dimostrazione della fattibilità tecnica della trasmutazione in un ADS (**XT-ADS**)
 - realizzazione a tempi brevi, circa 10 anni (da definire nel 7 PQ e avviare nell'8 PQ)
 - citazione tra i progetti emergenti della Roadmap ESFRI
- Un progetto concettuale per una facility europea modulare (da parecchi 100 MWth) per la trasmutazione a livello industriale (**EFIT**)
 - da realizzarsi a tempi lunghi

Evoluzione del concetto

FP

Importante contributo Italiano con TRASCO (ENEA, INFN, ANSALDO)

Design Concepts

Objectives

FP5

2001-2004

XADS (Pb-Bi)

80 MW_{th}

110 W/cm

single batch loading

XADS (Gas)

80 MW_{th}

250 W/cm

single batch loading

MYRRHA (Pb-Bi)

50 MW_{th}

< 500 W/cm (peak)

multi batch loading

XADS

Demonstration of technological feasibility of an ADS system

FP6

2005-2008

European Transmutation Demonstration

short-term demonstration

long-term demonstration

ETD / XT-ADS

50 - 100 MW_{th}
300 - 350 W/cm

(~700 W/cm³)

multi batch loading

ETD / EFIT

Several 100 MW_{th}
250 - 300 W/cm

(450-650 W/cm³)

multi batch loading

XT-ADS

Short-term Demonstration of transmutation on a sizable scale and of the ADS behaviour

EFIT

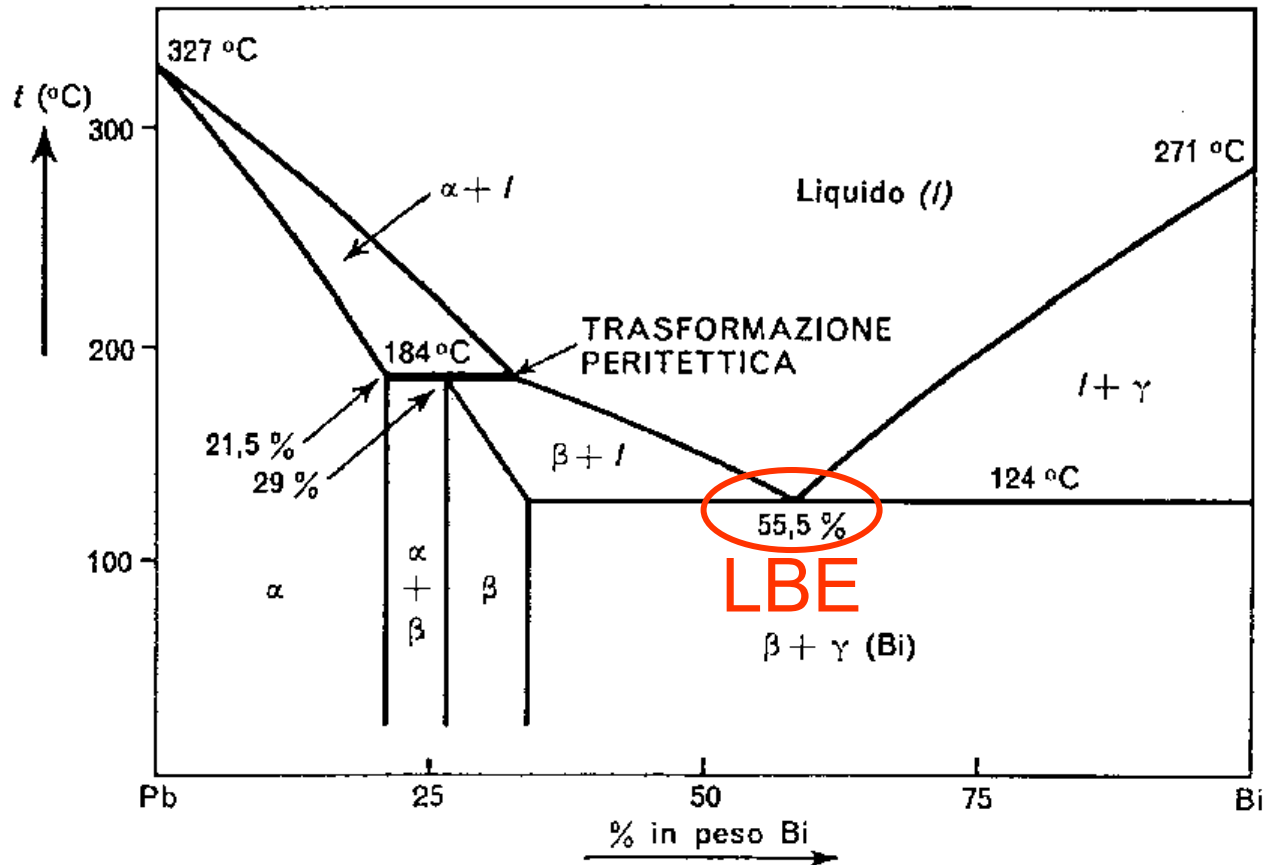
Long-term Transmutation on an industrial scale

European Transmutation Demonstration

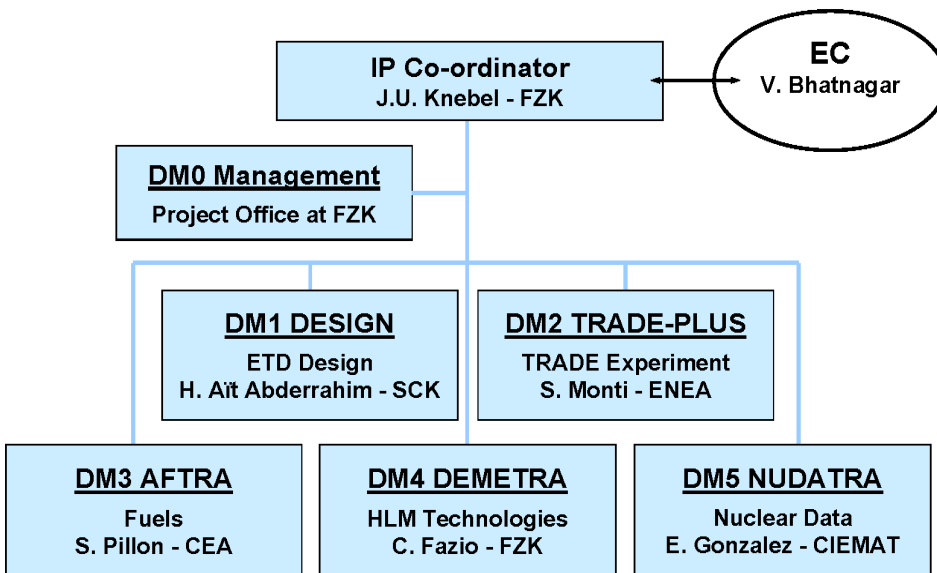
- **XT-ADS (Prototipo ADS)**
- Facility di irraggiamento e test bench di EFIT
- Potenza 50-100 MWth
- keff circa 0.95
- Fascio di protoni (ca **1.5 MW**):
350 MeV x 5 mA or
600 MeV x 2.5 mA
- Combustibile convenzionale di tipo MOX
- Raffreddamento con eutettico Piombo-Bismuto
- **EFIT (Bruciatore Industriale)**
- Bruciatore industriale di scorie
- Potenza di parecchi 100 MWth
- keff circa 0.97
- Fascio di protoni (ca. **16 MW**):
800 MeV x 20 mA
- Nuovo combustibile ricco di attinidi e privo di uranio
- Raffreddato a Piombo (He come soluzione backup)

Pb-Bi o Pb?

- Il Pb ad alte temperature è corrosivo per i materiali strutturali e si verificano problemi di infragilimento
 - tecnologia russa controllo attività ossigeno nei reattori navali



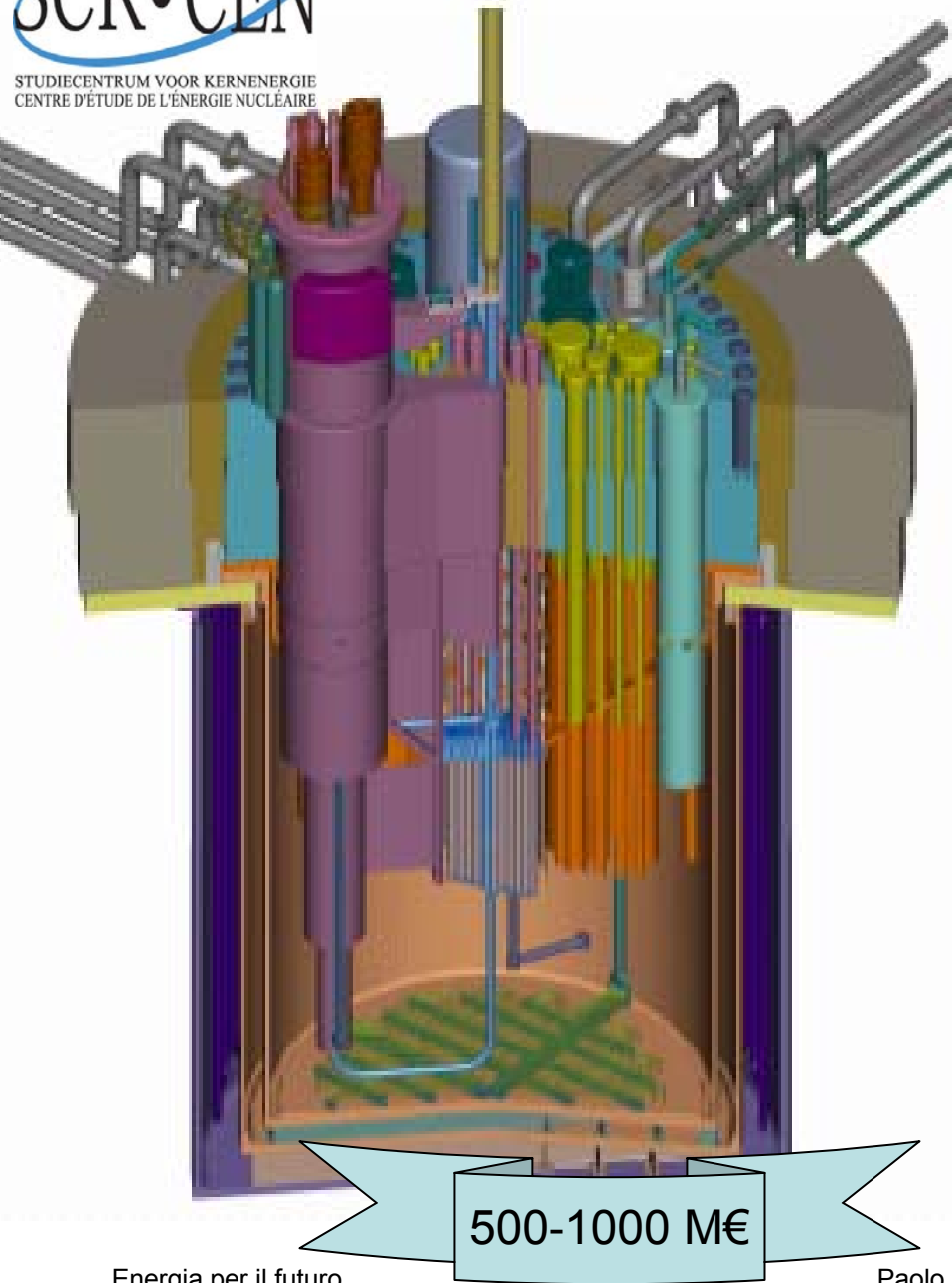
5 aree tecniche



- **Progetto dei sistemi ADS** e dei loro componenti
 - **Working package dedicato all'acceleratore**
- Studi sperimentali su **Accoppiamento** di un acceleratore, un target e di un reattore sottocritico
 - Esperimento Guinevere presso il reattore VENUS di Mol (B)
- Studio di **Combustibili**
- **Tecnologie** dei metalli liquidi per i trasmutatori
 - Progetto della regione di spallazione “senza finestra” (di fascio)
- **Dati nucleari** per la trasmutazione

Progetto dei sistemi: XT-ADS

- Scopo è quello di sviluppare un progetto per la **realizzazione in tempi** brevi di una dimostrazione sperimentale della fattibilità tecnica di un sistema ADS (XT-ADS) per la trasmutazione
 - XT-ADS ha **obiettivi comunque ambiziosi**:
 - il suo sviluppo in tempi brevi impone l'utilizzo di combustibile noto (MOX) e operazione a temperature ridotte
 - **I tempi richiesti per lo sviluppo di un nuovo combustibile e il suo licensing per reattori commerciali è stimato in 20-25 anni!**
 - Uso dell'eutettico Pb-Bi come liquido primario di raffreddamento per abbassare la temperatura del reattore
 - » problemi di corrosione di materiali strutturali in Pb ad alte T
 - richiede l'installazione di dispositivi sperimentali per l'irraggiamento del combustibile, che influenzano il core del reattore
 - XT-ADS è uno strumento per verificare i componenti degli EFIT e per provarli in un ambiente realistico di irraggiamento neutronico



XT-ADS: MYRRHA

- Il reattore belga BR2 a Mol è stato decommissionato da poco
 - il Belgio vuole costruire una nuova facility per irraggiamento, ad alto flusso neutronico
 - **Proposta MYRRHA per candidare Mol per il sito europeo dell'XT-ADS**
 - Soddisfa tutti i requisiti XT-ADS
 - Combustibile MOX
 - Pb-Bi
 - Target senza finestra

combustibile MOX e core

UO₂-PuO₂ MOX of 95 % TD
with ≤ 30 wt% Pu in heavy metal

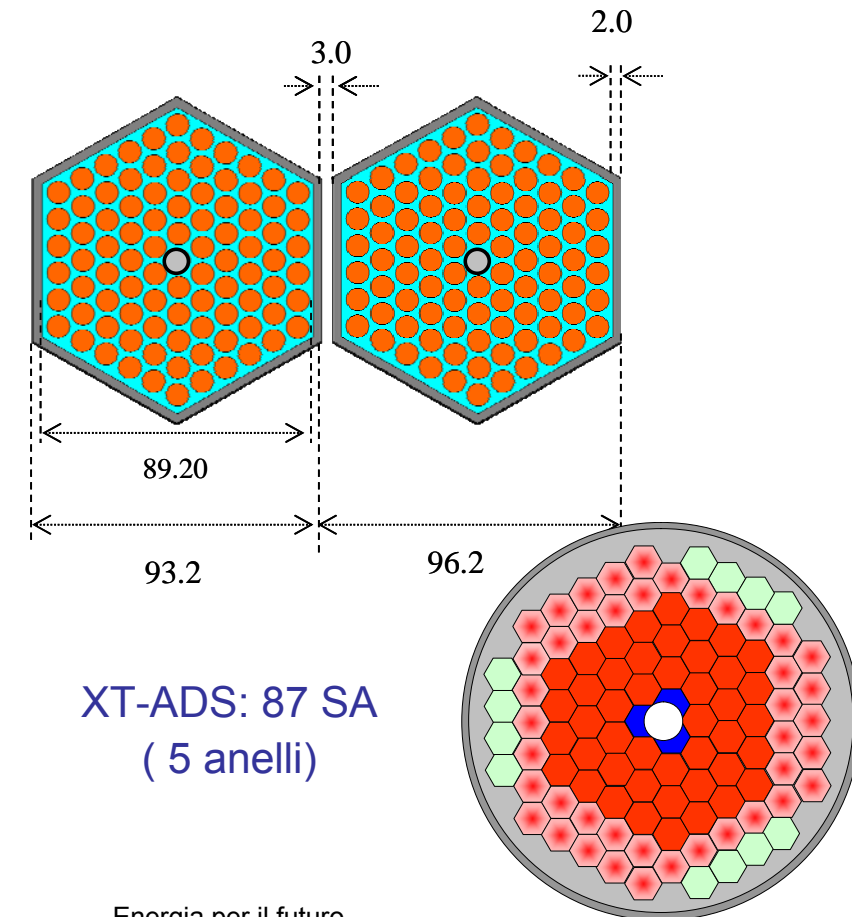
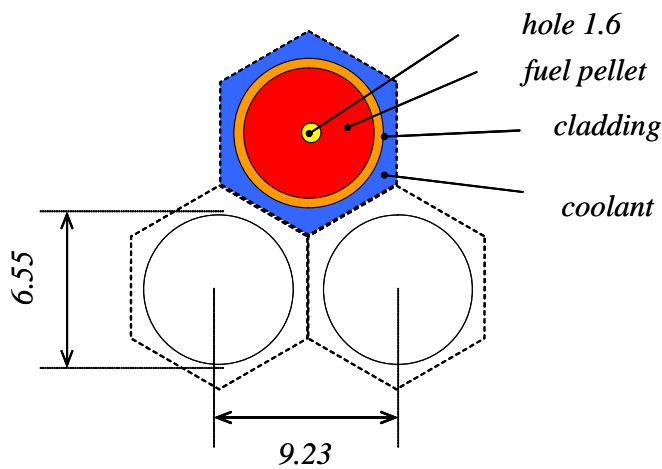
MOX-2 (CEA proposal)

PLUTONIUM	
Isotope	Content wt. %
²³⁸ Pu	2,33
²³⁹ Pu	56,87
²⁴⁰ Pu	27,00
²⁴¹ Pu	6,10
²⁴² Pu	7,69

URANIUM	
Isotope	Content wt. %
²³⁴ U	0.005
²³⁵ U	0.400
²³⁶ U	0.000
²³⁷ U	0
²³⁸ U	99.595

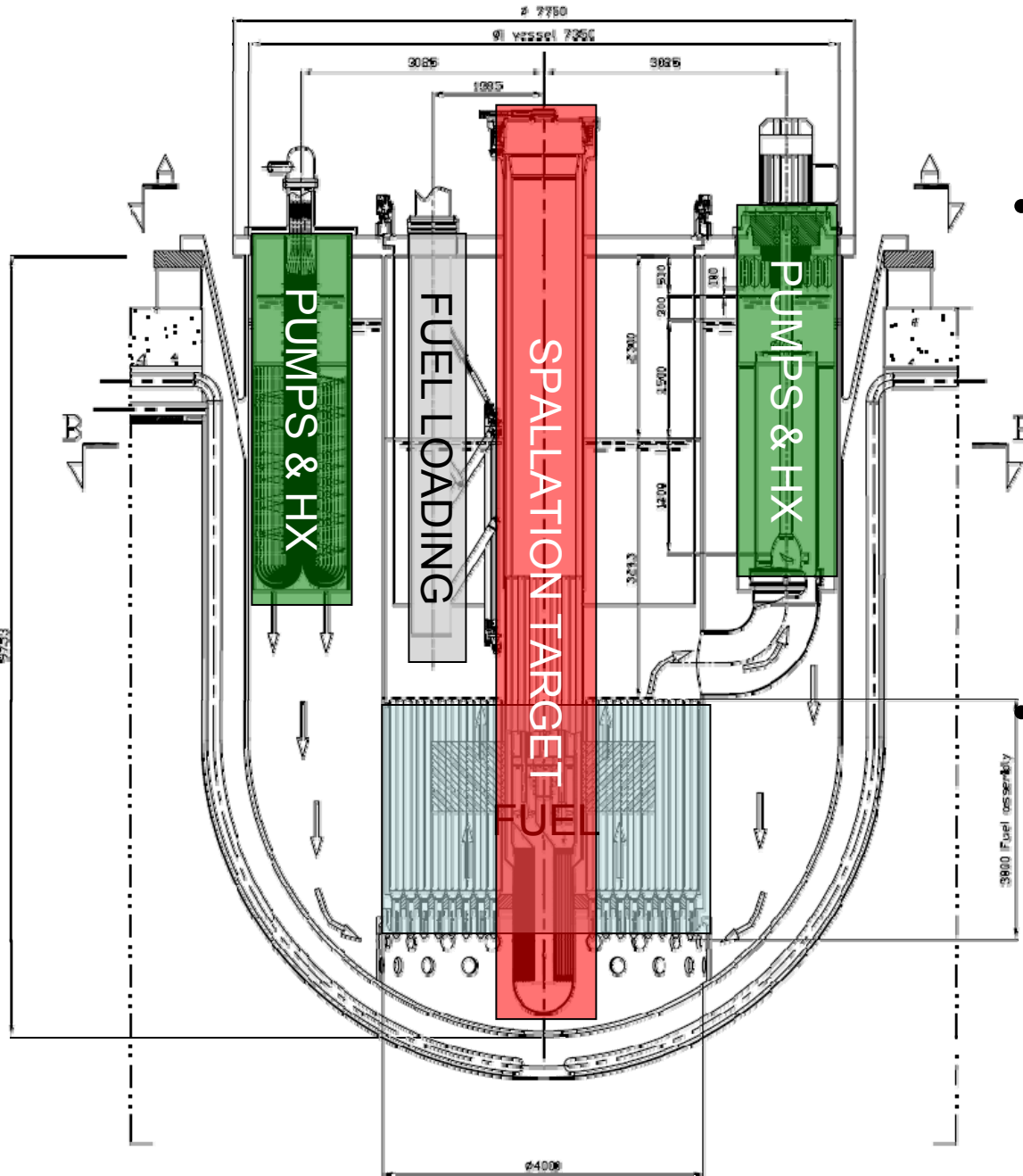
Pu da combustibile esausto UOX dei PWR:

- arricchimento iniziale 4.5 wt.% ²³⁵U
- burnup 45 MWd/kg-iHM,
- 15 anni di stoccaggio



Progetto dei sistemi: EFIT

- Sviluppo del **progetto concettuale** per la facility di trasmutazione industriale (EFIT)
 - Sufficientemente dettagliato per consentire una stima parametrica dei costi
 - Caratteristiche minime per EFIT:
 - alte potenze con un design compatto
 - produzione di energia elettrica (generatori vapore)
 - raffreddato a piombo
 - utilizzo di combustibile senza uranio per aumentare lo smaltimento dei transuranici
 - EFIT e XT-ADS condividono le stesse caratteristiche di massima e consentono raffronti di scala
- Esiste inoltre una soluzione di backup per un EFIT raffreddato a He gas, nel caso Pb si dimostri impraticabile



- Sviluppato a partire dal design ANSALDO per TRASCO, assunto come base per PDS-XADS

Utilizzo di Pb come circuito primario e nel target di spallazione

- maggiori temperature, se si riescono a risolvere problemi corrosione

Obiettivi di progetto EFIT

- Smaltimento efficace degli attinidi
- Evitare la produzione di Pu, partendo da combustibile senza U
 - per accettabilità dell'opinione pubblica
 - ragioni di proliferazione
- **Parametri di progetto Δ (Massa/Energia prodotta)**
tasso di smaltimento attinidi di progetto
 - **$MA \rightarrow -42 \text{ kg/TWh}$**
 - **$Pu \rightarrow 0 \text{ kg/TWh}$**
- Criterio di ottimizzazione delle dimensioni dell'impianto
 - minimo costo per kg di attinidi utilizzati in fissione

le specifiche tecnologie per un ADS

- Rispetto ai reattori veloci di GEN IV, con cui condividono alcune caratteristiche (elevate temperature, problematiche di combustibile, criteri di sicurezza e analisi probabilistiche...), le **caratteristiche specifiche** degli ADS sono:
 - la **dinamica accoppiata** del reattore pilotato da una sorgente esterna di neutroni veloci
 - lo **spettro di neutroni** prodotti per spallazione si estende fino all'energia del fascio incidente
 - problematiche di **affidabilità dei database di sezioni d'urto nucleari** nell'intero range di energie in gioco (Attività NUDATRA)
 - impatto sulla **affidabilità dei programmi per simulare la dinamica** del reattore sottocritico
 - Necessità di validazione sperimentale!
 - il **target di spallazione**
 - la sorgente intensa di protoni (i.e. un **acceleratore!**)

l'accoppiamento acceleratore-reattore

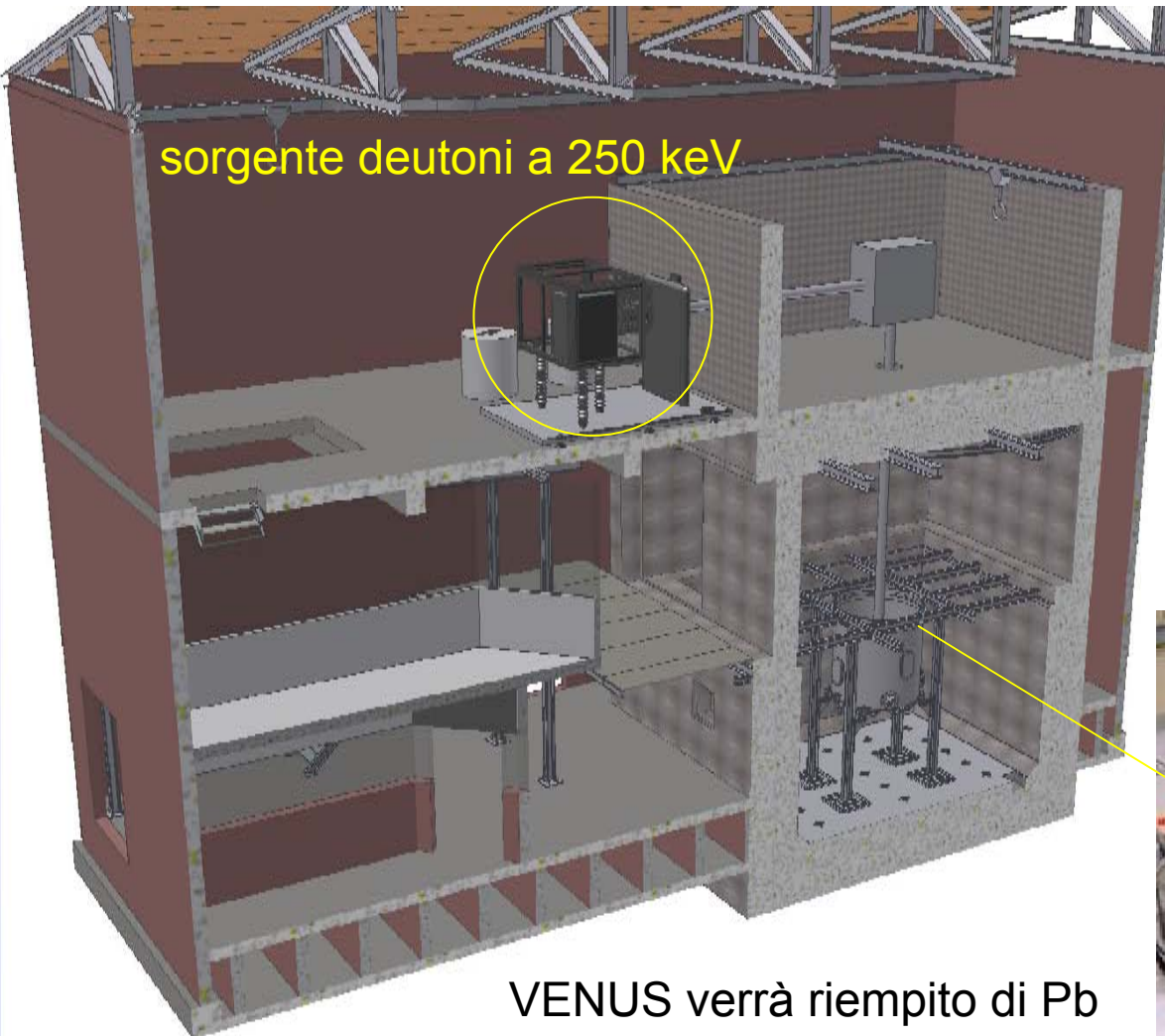
- Una parte del programma prevede l'**accoppiamento** di un **reattore** veloce di test in Pb (modifiche al reattore VENUS di Mol) con un **acceleratore** di deutoni per
 - verificare **dinamica di un reattore sottocritico** a bassa potenza (circa 100 W) pilotato da acceleratore cw in ampio range di parametri (sottocriticità, margini di sicurezza, effetti termici)
 - proseguimento del programma iniziato a Cadarache a **P=0** e fascio impulsato (MUSE = MASURCA + GENEPI)
 - determinare sperimentalmente la **relazione corrente-potenza** (e calibrare simulazioni)
 - investigare la **fisica di un reattore veloce in Pb** (e diagnostica!)
 - affrontare in un sistema semplificato tutte le **tematiche di sicurezza e licensing** assieme alle autorità del Belgio, che dovranno poi occuparsi del licensing di XT-ADS
- **GUINEVERE = VENUS + GENEPI**

Generator of **U**ninterrupted **I**ntense **NE**utrons at the lead **VE**nus **RE**actor

GUINEVERE

Importante prova per verificare le metodologie di controllo dinamico della sottocriticità del sistema

Argomento fondamentale per affrontare il licensing di un ADS

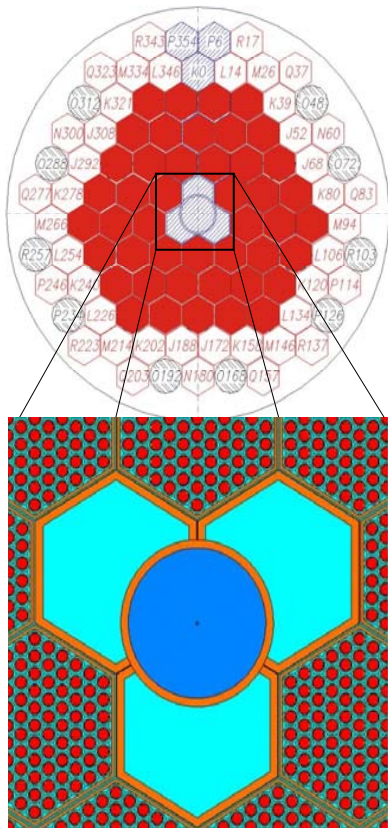


VENUS verrà riempito di Pb (ora ad acqua) e dotato di un combustibile U metallico arricchito al 30% (circa 1200 kg)

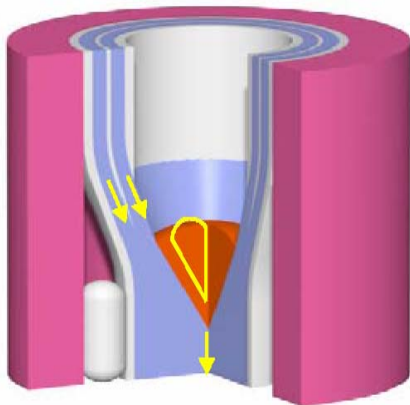


- **Definizione, qualifica e sviluppo** per EFIT
 - combustibile a base di ossidi privi di U
 - alto contenuto di attinidi
 - raffreddamento in Pb
- **Problematiche**
 - Poche proprietà del combustibile sono note
 - Non è noto il comportamento sotto irraggiamento
 - La modellistica non è qualificata (licensing)
- **Lavoro tecnico**
 - Modellistica
 - Prove di irraggiamento e misure di proprietà fisiche
- **Pre-selezione del combustibile**
 - Ossidi composti $(Pu, MA, Zr)O_2$; $(Pu, MA)O_2 + MgO$ o Mo
 - Nitride inert matrix fuel: $(Pu, MA, Zr)N$

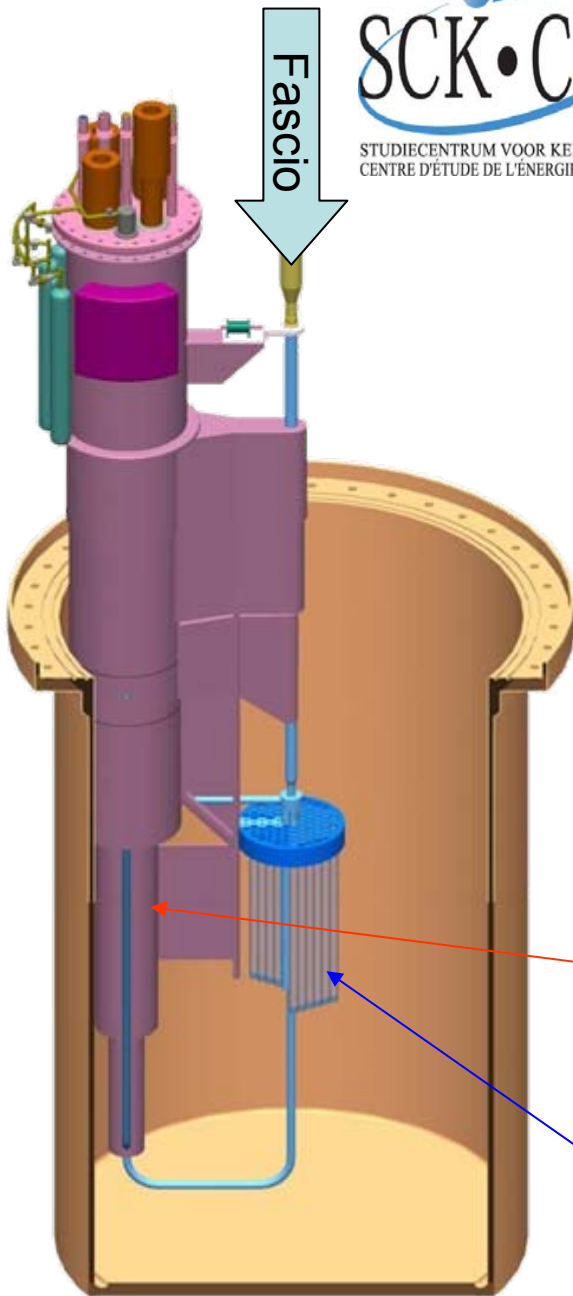
Il target di spallazione



- Deve essere accomodato nel centro del nocciolo (al posto delle tre barre centrali)
- Deve produrre circa 10^{17} neutroni/s per alimentare il reattore @ $k_{\text{eff}}=0.95$
- Deve dissipare **1-1.6 MW di deposizione energia dal fascio (XT-ADS)**
 - $T_{\text{superficie}} < 450^{\circ}\text{C}$ (evaporazione)
 - $\Delta T_{\text{global}} = 100^{\circ}\text{C}$
- Flusso LBE 10-20 l/s (corrosione!)
- P sopra al target $< 10^{-3}-10^{-4}$ mbar
 - Vita media compatibile con il reattore (> 1 anno)



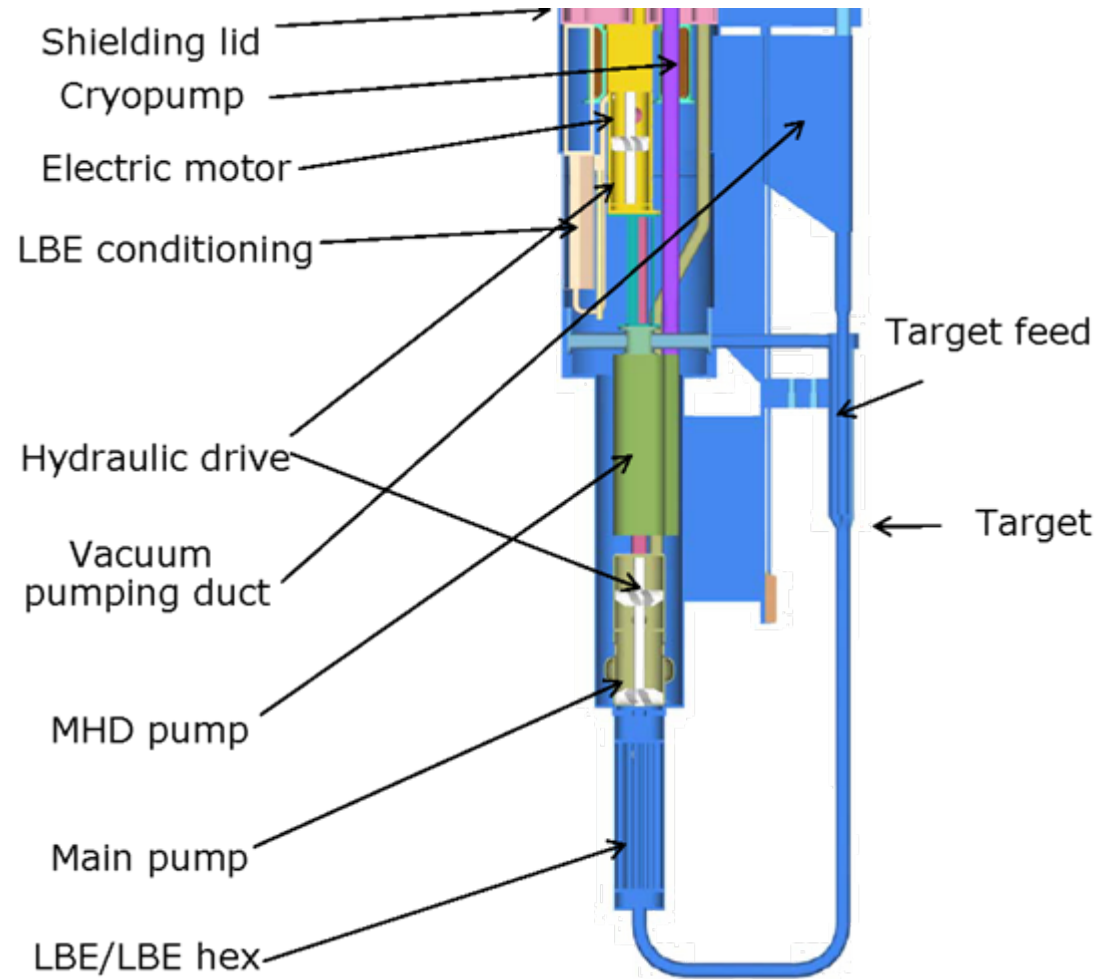
Target “windowless”



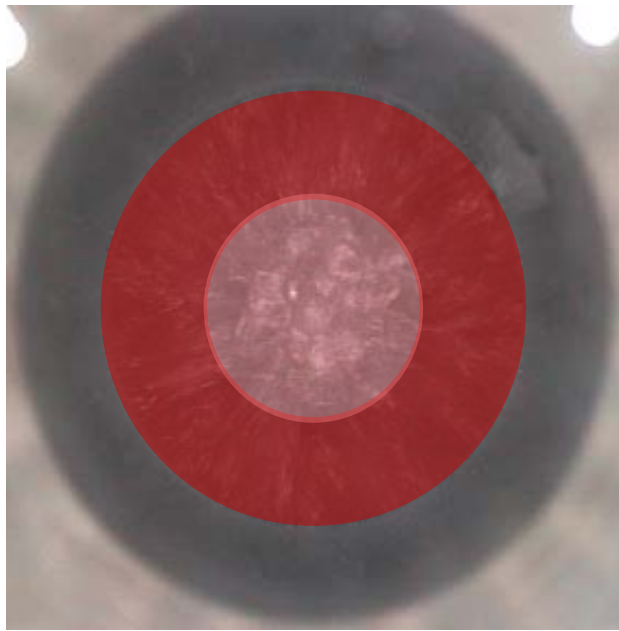
- La **finestra di fascio** è uno dei componenti più critici di cui garantire l'integrità
 - ipotesi di assenza di una finestra fisica tra l'ambiente a pressione atmosferica del target e il vuoto della linea di fascio
- Flusso verticale coassiale confluyente di LBE, con zona di **ricircolo** centrale e formazione di una **superficie libera per il fascio**
- **Pompe e scambiatori di calore** del circuito di spallazione al di sotto del pelo libero e fuori asse rispetto al **nocciolo**

il circuito del target

- Flusso forzato di LBE
 - Corrosione dei materiali strutturali, ad elevata T
 - Controllo O₂ per inibire la corrosione
- Pompaggio differenziale tra target (P=1 atm) e vuoto fascio
 - prodotti di spallazione volatili!
- Formazione plasma per interazione fascio con vapori di LBE

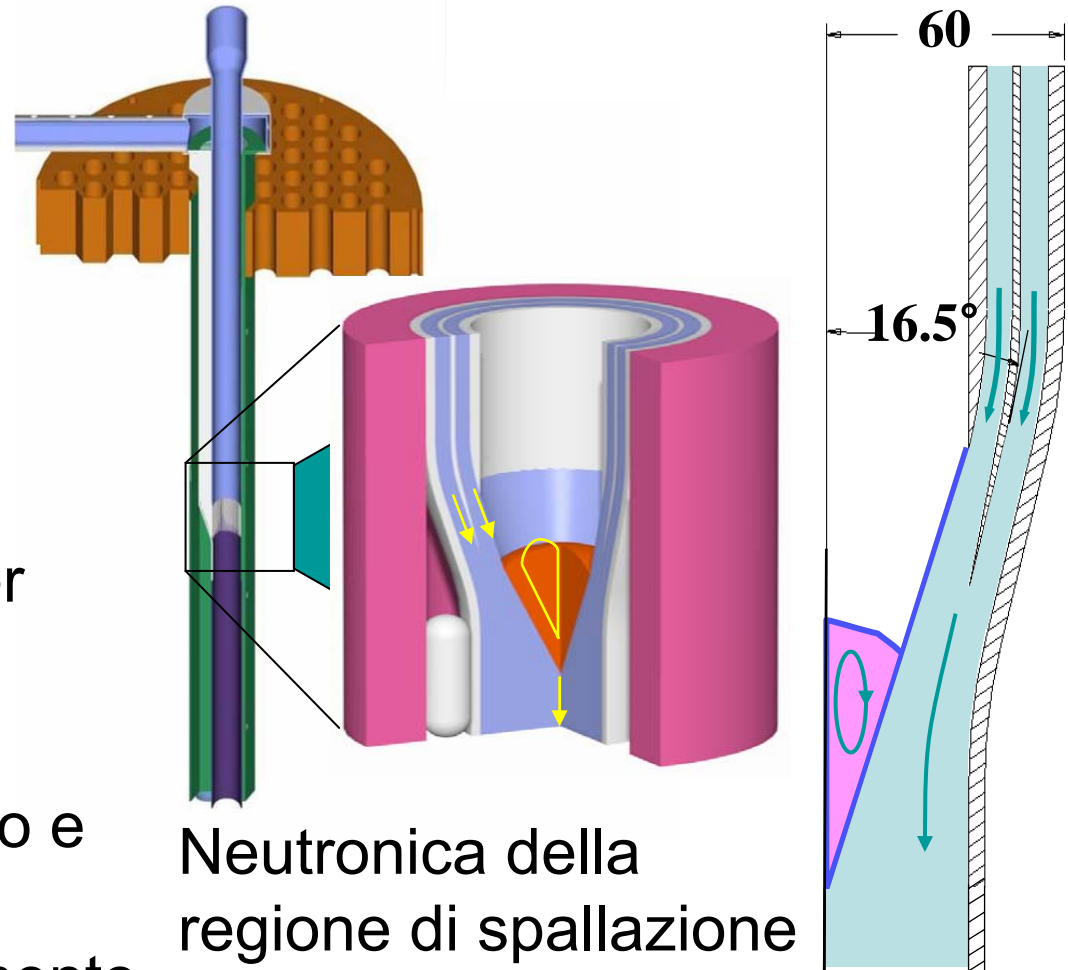


- Problema della formazione Po da Bi



regione di spallazione

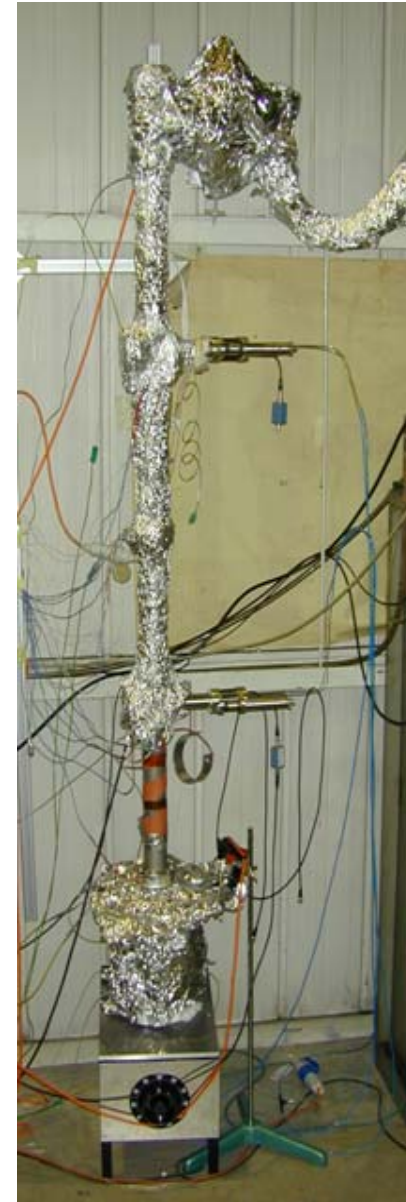
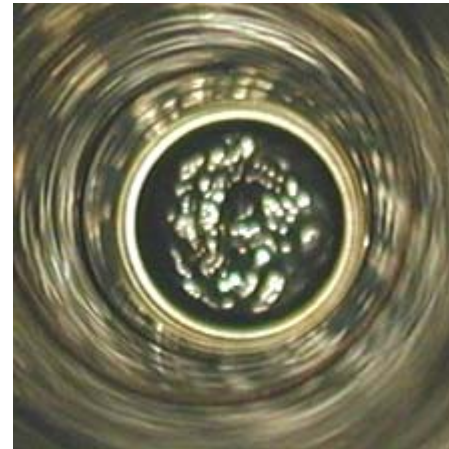
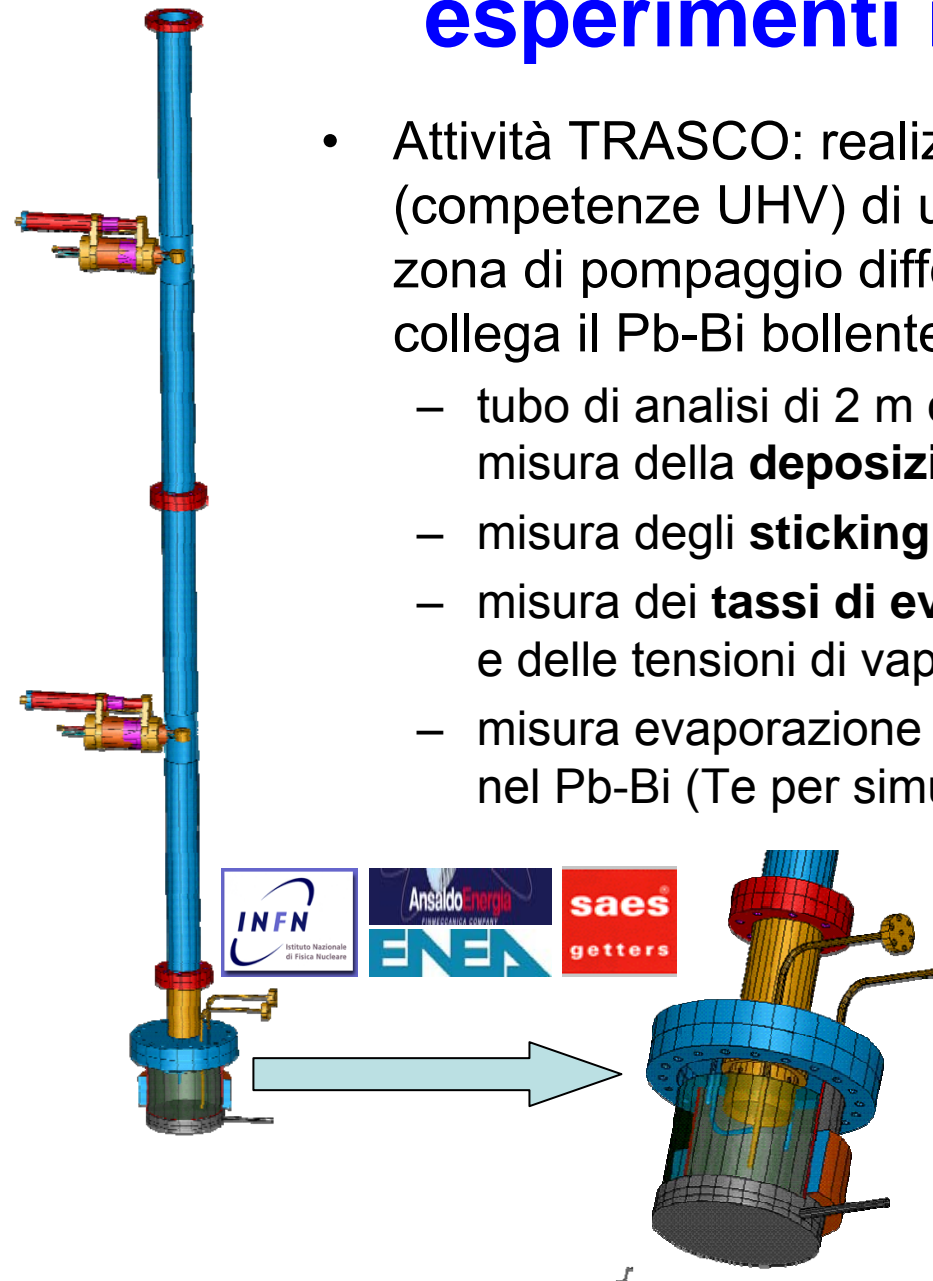
- Flusso LBE ottenuto per gravità
- Problema termoidraulico e termomeccanico molto **complesso** (es. trattamento free surface)



Neutronica della regione di spallazione per valutare il termine di sorgente e rilascio prodotti nel target

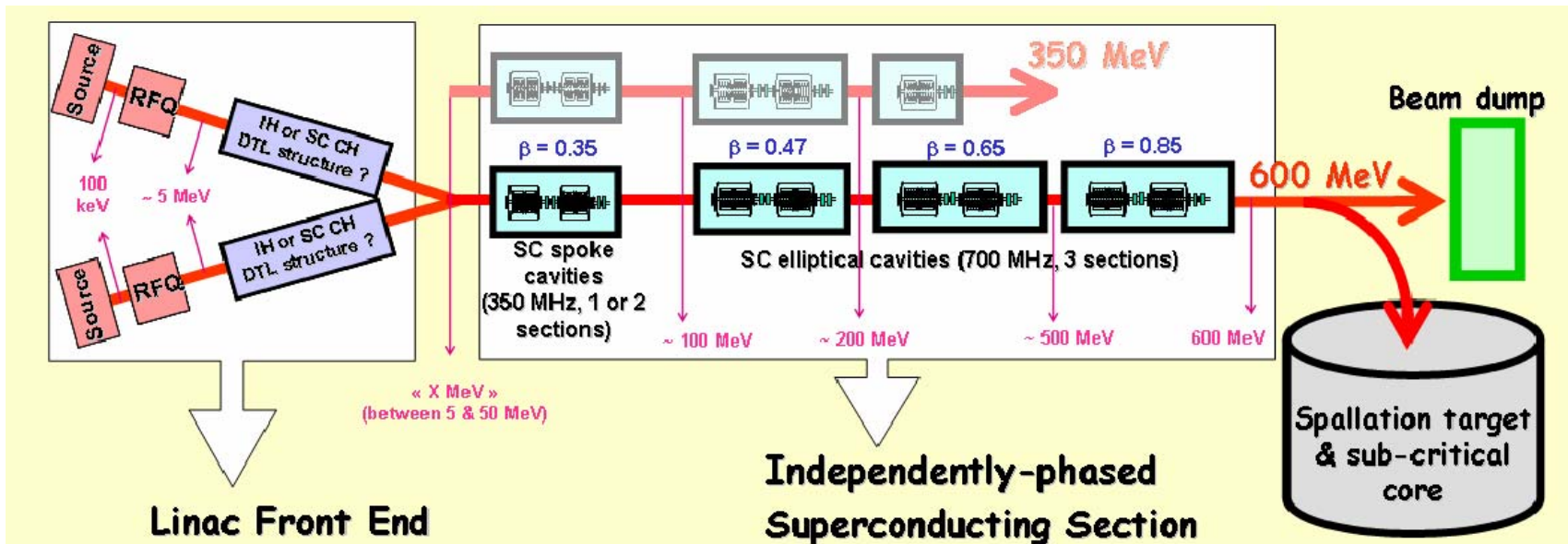
esperimenti interfaccia LBE/vuoto

- Attività TRASCO: realizzazione al LASA (competenze UHV) di un modello della zona di pompaggio differenziale che collega il Pb-Bi bollente alla linea in vuoto
 - tubo di analisi di 2 m con strumenti per la misura della **deposizione dei condensabili**
 - misura degli **sticking factor**
 - misura dei **tassi di evaporazione in vuoto** e delle tensioni di vapore
 - misura evaporazione di componenti disciolti nel Pb-Bi (Te per simulazione Po)



l'acceleratore di protoni

- Lo schema concettuale sviluppato con PDS-XADS
 - Scelta di un linac superconduttivo (**fascio CW!**)
 - Modulare: stesso concetto per XT-ADS o EFIT (E, I)
 - Principali componenti tecnologici già sviluppati (es. TRASCO)



uso della tecnologia RF superconduttiva

- L'acceleratore si basa pesantemente sulla **tecnologia RF superconduttiva**, il cui stato dell'arte è avanzato negli ultimi 15 anni grazie alla
 - Collaborazione TESLA (ora in International Linear Collider)
- Le elevate performance ottenute da TESLA nella produzione e operazione di sistemi acceleranti superconduttivi superano ampiamente i requisiti progettuali per un acceleratore di classe ADS
- Il LASA partecipa a TESLA e ha fornito componenti per l'acceleratore Test Facility fin dai primi anni 90
 - il coinvolgimento in TRASCO e in programmi CE deriva da ns. impegno SC-RF



gli acceleratori per ADS

- Specificità:
 - **Affidabilità e disponibilità di fascio**
 - Poche interruzioni di fascio per anno
 - assenze di fascio più lunghe di 1 s inducono sforzi sul combustibile, sulle strutture interne del reattore e sul vessel
 - Progettazione di componenti e l'operazione deve seguire le procedure orientate all'affidabilità utilizzata dalla comunità nucleare
 - strong design (sovradimensionamento)
 - pianificazione di ridondanze e capacità di tolleranza ai guasti
 - **Modalità di funzionamento ad alta potenza in CW**
 - Con la possibilità di microinterruzioni (200 μ s) a bassa frequenza di ripetizione per il monitoraggio della sottocriticità
 - Questo è l'argomento principale a supporto della **scelta superconduttiva**, poiché si limitano enormemente le perdite resistive nelle strutture di rame che sono dominanti nelle macchine normalconduttive rispetto alla potenza richiesta dal fascio per l'accelerazione

la questione della affidabilità

- **Esistono pratiche consolidate volte al raggiungimento di buona affidabilità in sistemi complessi (Reliability Engineering)**
 - Ampi margini rispetto ai limiti della tecnologia
 - Componenti ridondanti
 - Procedure e componenti che consentano tolleranza ai guasti
- **Importanza delle ridondanze nei componenti critici**
 - Sorgente di protoni, RFQ, stadio di bassa energia
 - **Duplicazione** dell'iniettore!
- **Gestione delle ridondanze “naturali” nel linac superconduttivo**
 - Un linac SC ha un **elevato grado di modularità**
 - La linea di fascio è una successione di “periodi” quasi identici
Tutti I componenti sono lontani dai limiti tecnologici
 - Un linac superconduttivo consente un ampio margine di tolleranza ai guasti di cavità e magneti
 - E' necessari però un sistema di controllo dell'RF che ne consenta l'implementazione

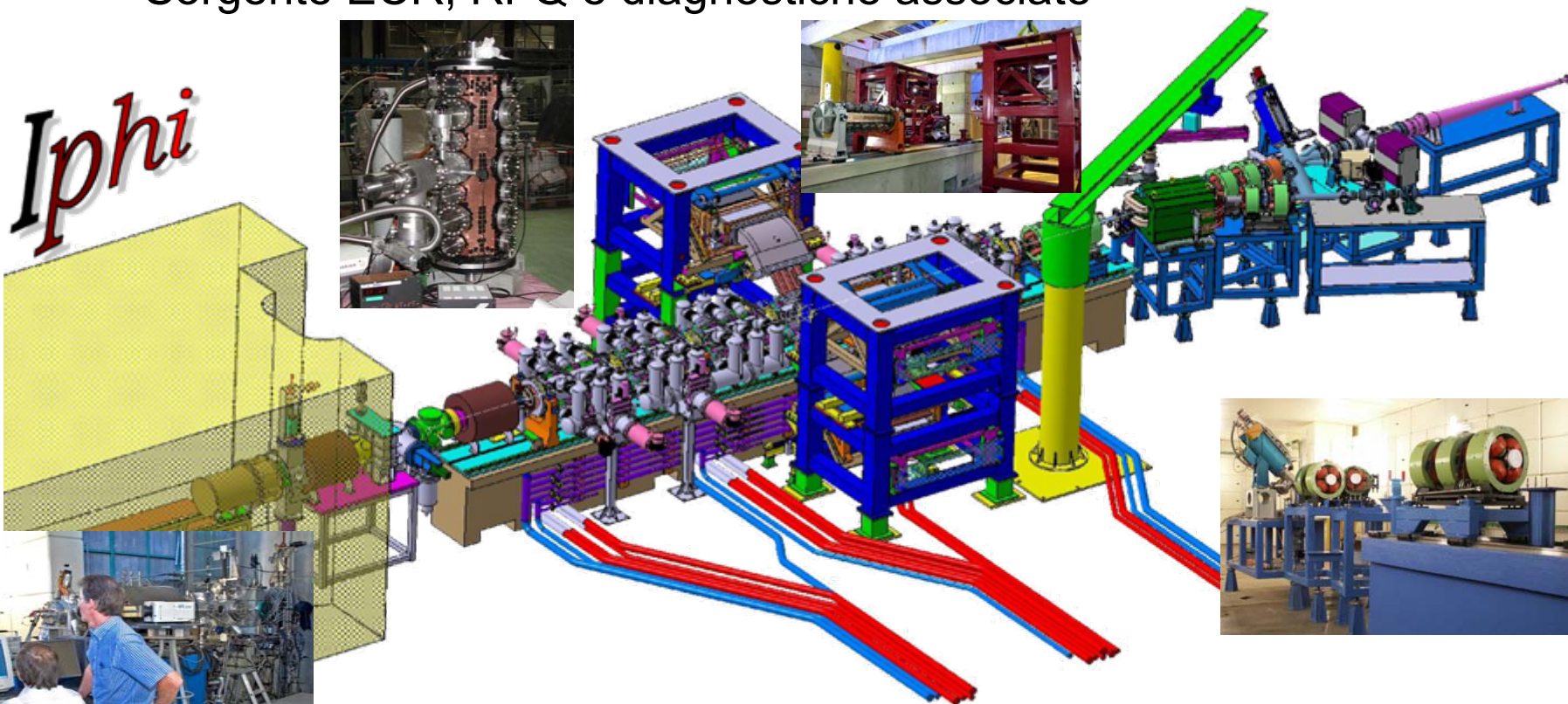
attività sugli acceleratori in EUROTRANS

- Valutazione sperimentale dell'**affidabilità dell'iniettore** di protoni
 - campagne di misure dedicate al CEA su IPHI
- Scelta dei componenti per l'accelerazione nella regione di **energia intermedia**
 - Confronto tra tre strutture acceleranti
- Qualificazione di un **criomodulo** per lo stadio di alta energia a piena potenza e in condizioni nominali di operazione
- Progettazione e test di un **sistema di controllo RF** per l'implementazione della tolleranza ai guasti
- Studio della **configurazione dell'acceleratore** con analisi di affidabilità e stime di costi

test di affidabilità dell'iniettore

- L'iniettore **IPHI**, sviluppato in Francia dal CEA e CNRS sarà utilizzato, prima dell'installazione al CERN, per una **campagna di test lunghi per dimostrarne le caratteristiche di affidabilità**
 - Sorgente ECR, RFQ e diagnostiche associate

Iphi



iniettore: test lunghi

- Il fascio di protoni, con energie di 3 MeV, sarà operato per due mesi ininterrottamente con correnti nella regione $20 \text{ mA} < I < 40 \text{ mA}$

Negli anni scorsi la sorgente è stata operata in turni di una settimana

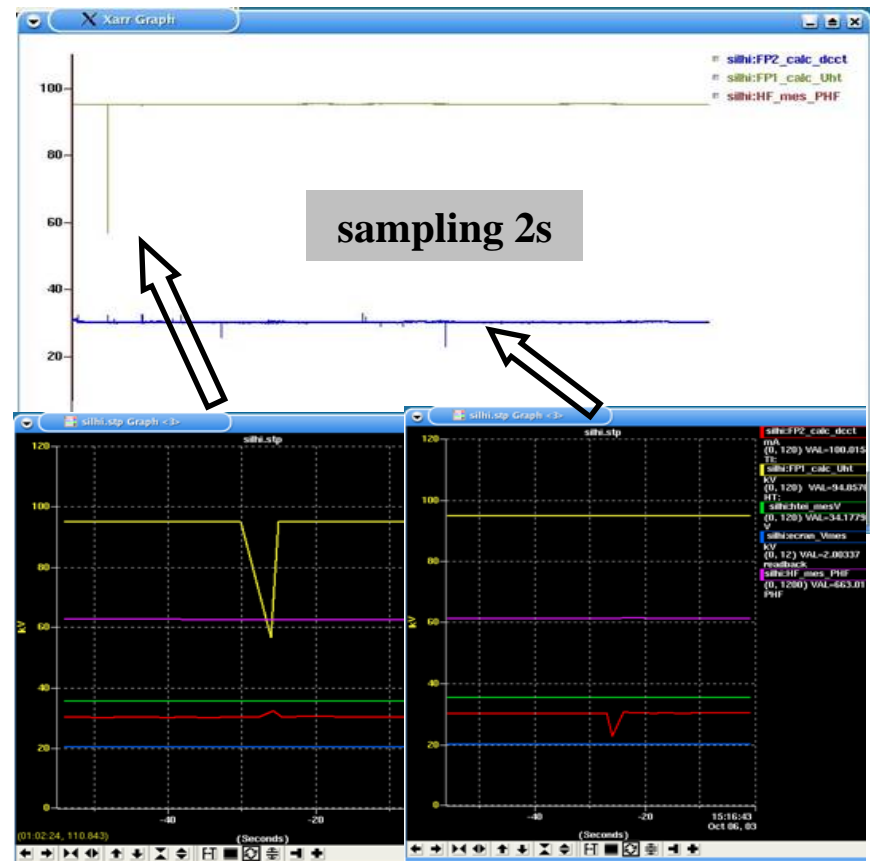
run da 162 ore

Blu, corrente estratta, 30 mA CW,
Stabilità +/- 0.2 mA
con feedback sulla potenza RF

fascio 30 mA, 95 keV CW

Conclusione:

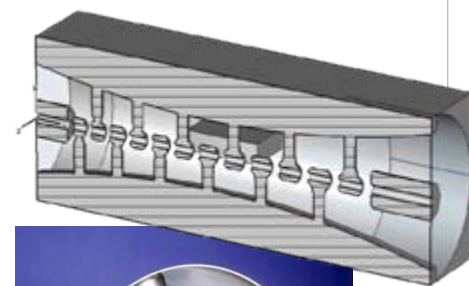
- **Nessuna interruzione di fascio**
- **1 scarica dagli elettrodi senza interruzione di fascio**



strutture RF per le energie intermedie

- Differenti tipi di strutture sono "candidate" per la sezione di accelerazione fino a circa 20 MeV. Nel programma vengono sviluppati e caratterizzati prototipi dei seguenti tipi:

- Strutture DTL in rame del tipo **IH** senza elementi focalizzanti dentro I drift e con alta efficienza (IBA)
- Strutture superconduttive di tipo **CH** (IAP, Francoforte)
- Cavità di tipo **spoke** che possono operare da energie molto basse (a partire da circa 5 MeV) e che sono proposte anche per la sezione fino a 100 MeV circa (CNRS)

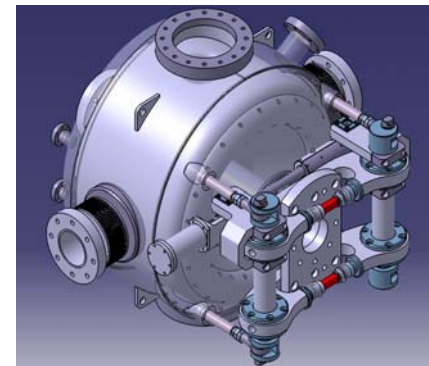
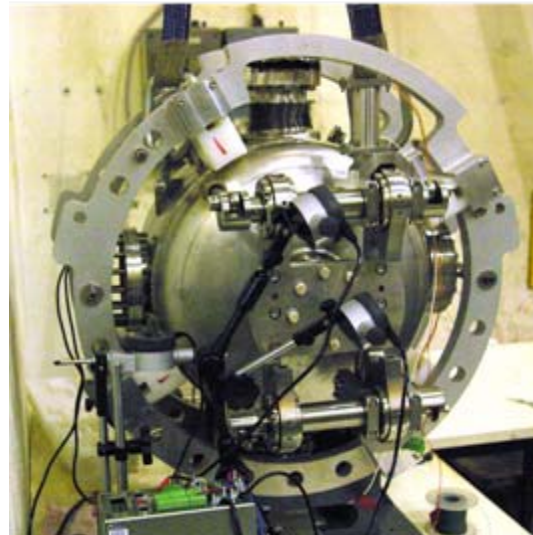
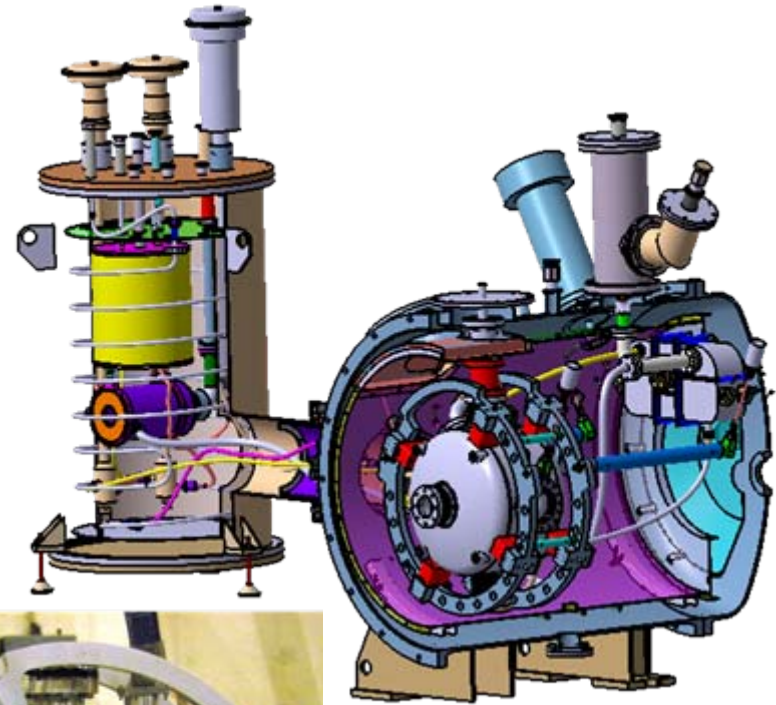


Iba

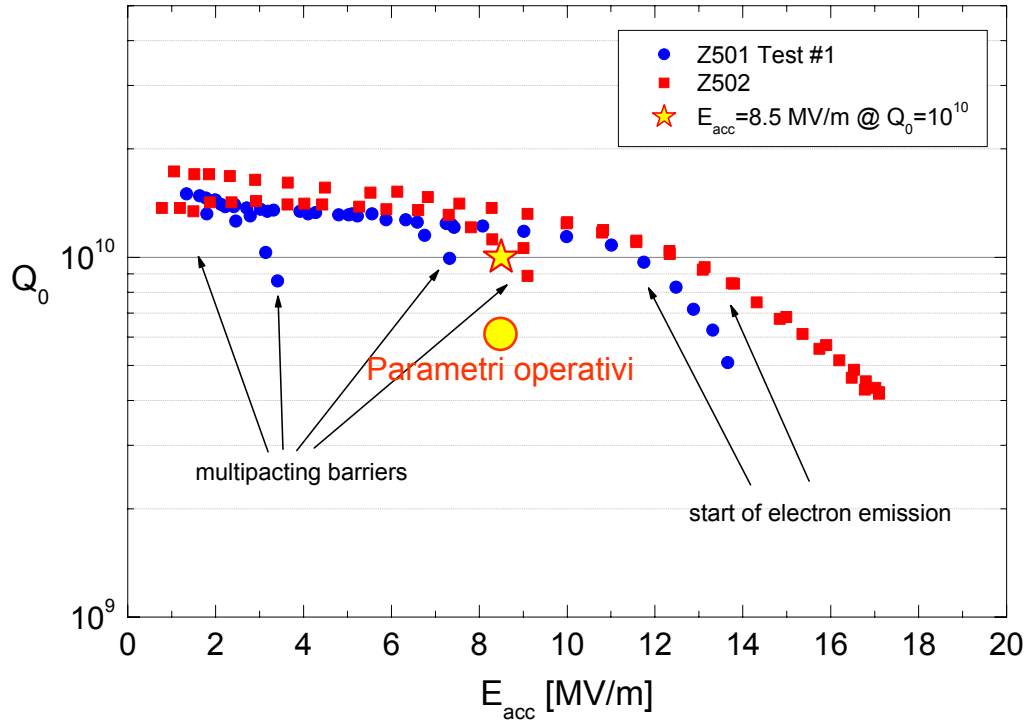


criomodulo per le cavità spoke

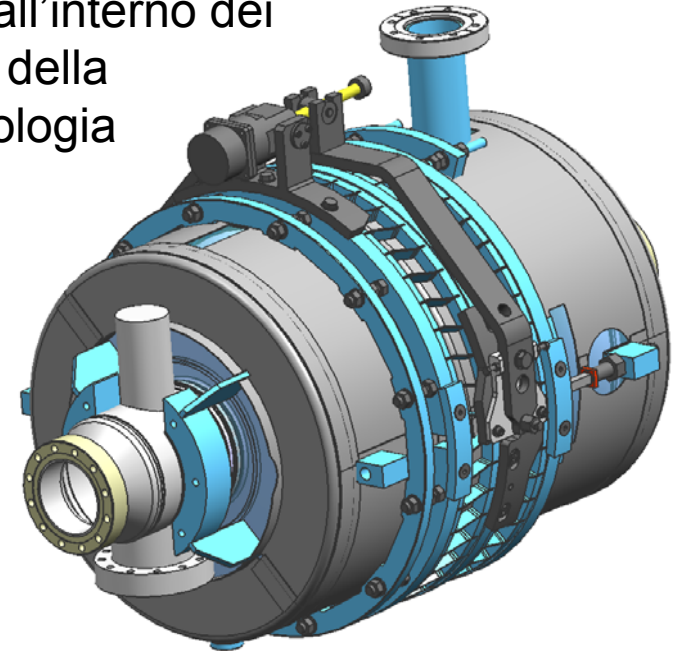
Test di una cavità spoke $\beta=0.15$ completamente equipaggiata (accoppiatore fondamentale, sistema di accordo), adattando un vessel esistente per le prove orizzontali



cavità per il linac sopra 100 MeV



Parametri di utilizzo nel linac ben all'interno dei limiti della tecnologia

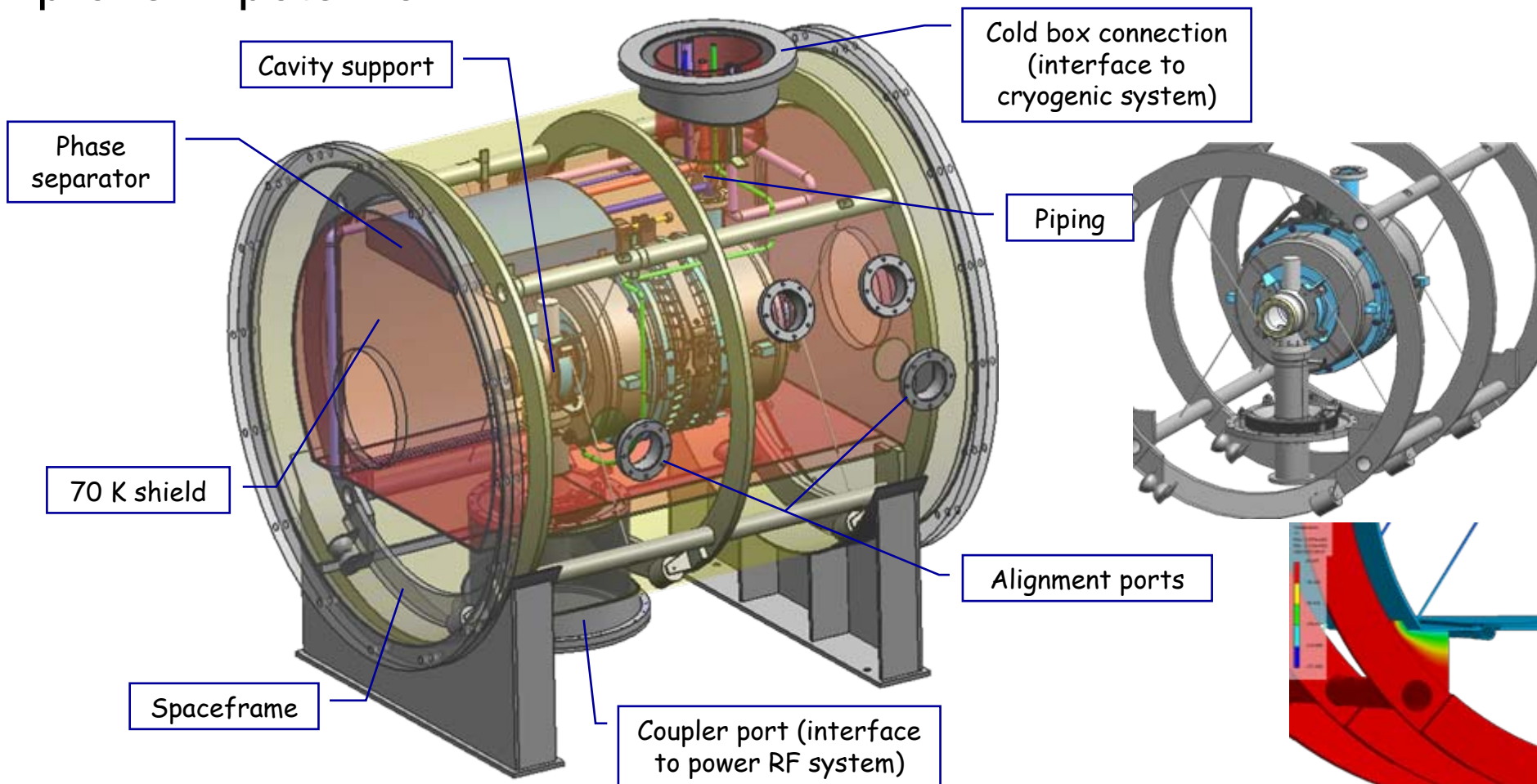


Due cavità $\beta=0.47$ (protoni da 100 a 200 MeV) sono state costruite (**Programma TRASCO al LASA**), e sono stati sviluppati i componenti ancillari (serbatoio criogenico, sistema accordo, accoppiatore)



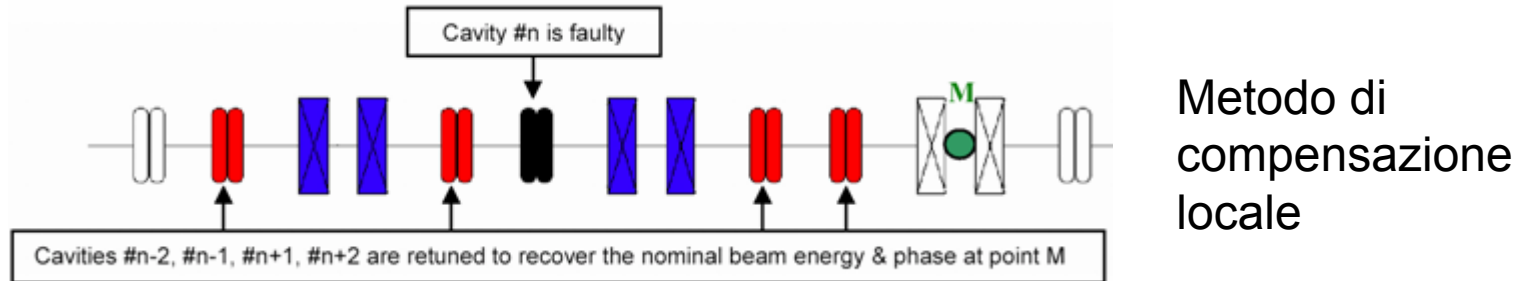
criomodulo per le cavità TRASCO

Nel corso di EUROTRANS il LASA svilupperà e costruirà un modulo, da installare presso il CNRS/IPN di Orsay per le prove in potenza



compensazione guasti RF

- il requisito di affidabilità richiede un sistema tollerante ai guasti degli alimentatori RF che alimentano le cavità

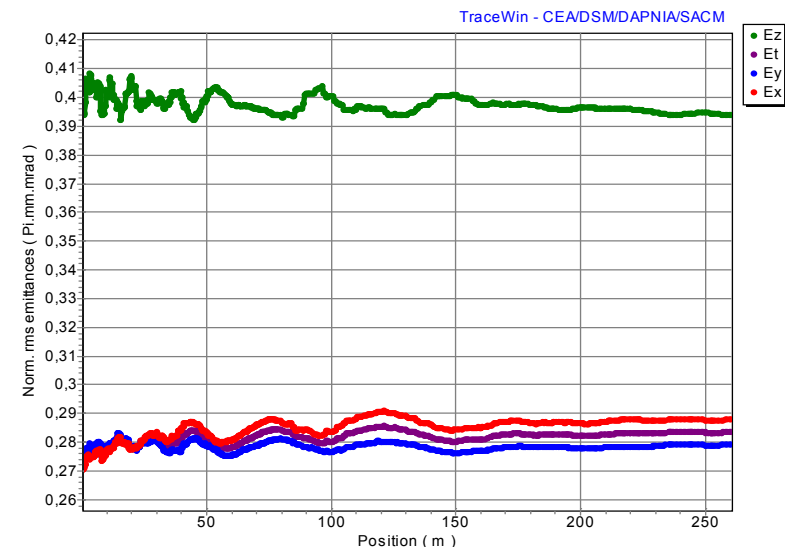
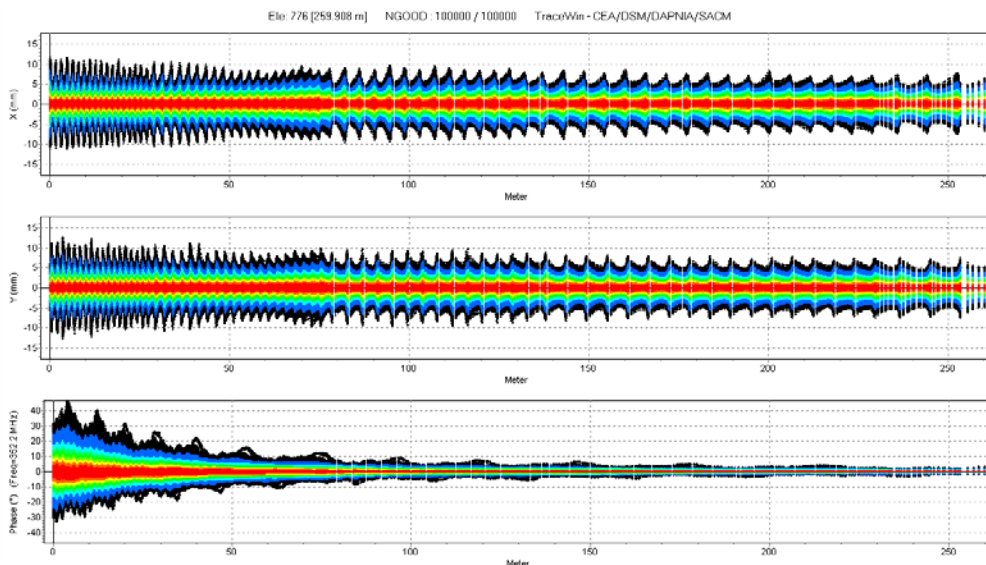
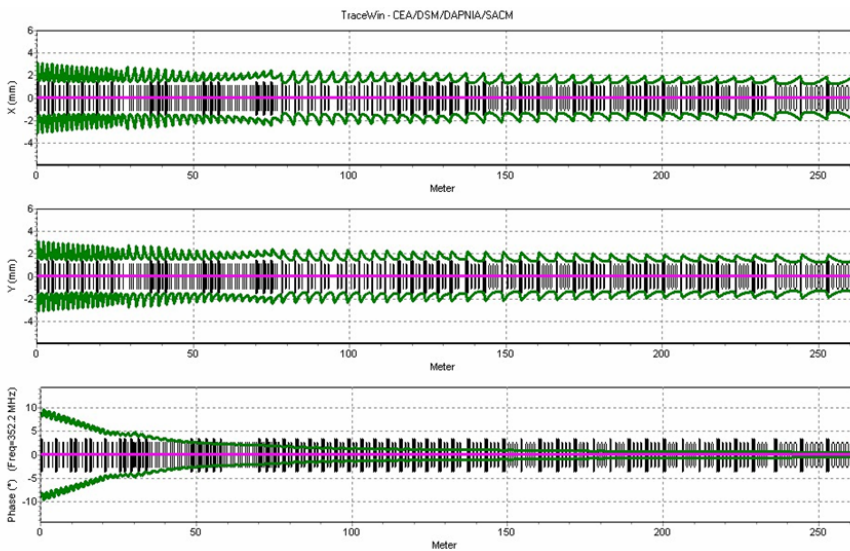


- ampi margini sugli alimentatori adiacenti
- Necessità di **individuare e sviluppare scenari di ripristino da guasti**, che siano efficaci e veloci
 - rilevamento dell'anomalia
 - comunicazione veloce tra sistemi di controllo a basso livello
 - aggiornamento, calcolo e variazione dei punti di lavoro
- Sistema di controllo volto ad assicurare stabilità
 - 0.5%-1% in termini di campo e 0.5°-1° in fase

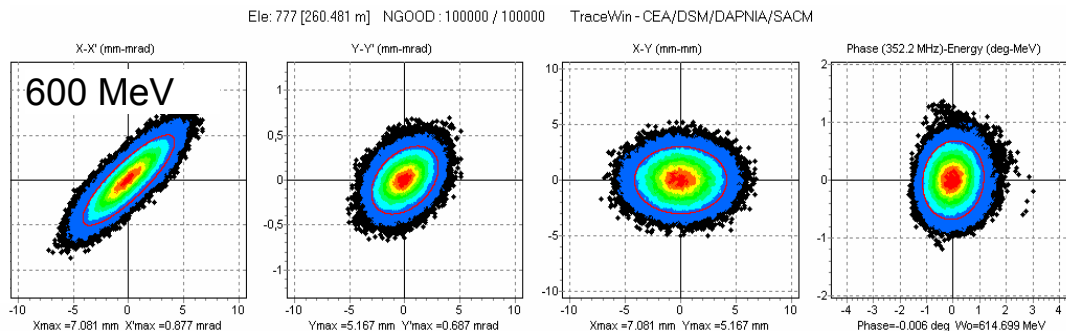
progetto dell'acceleratore

- **Esiste inoltre un task dedicato al progresso nel progetto concettuale dell'acceleratore, che ne verifica l'aderenza al progetto e si occupa di:**
 - **Simulazioni di dinamica di fascio** per le differenti proposte
 - simulazioni dalla sorgente alla linea di trasferimento al target per una varietà di opzioni delle strutture di energia intermedia
 - è in corso di implementazione la modellizzazione dei transienti indotti dai guasti dei componenti RF, in termini di effetti delle strategie di controllo sulla stabilità del fascio
 - simulazioni per gli scenari di recupero dei guasti
 - Analisi di **affidabilità** dell'acceleratore
 - utilizzando metodologie standard
 - Stime dei **costi**

Dinamica di fascio in condizioni nominali



Adiabaticità dei fasci lungo il linac (5-600 MeV)
Deterioramento minimo della qualità del fascio



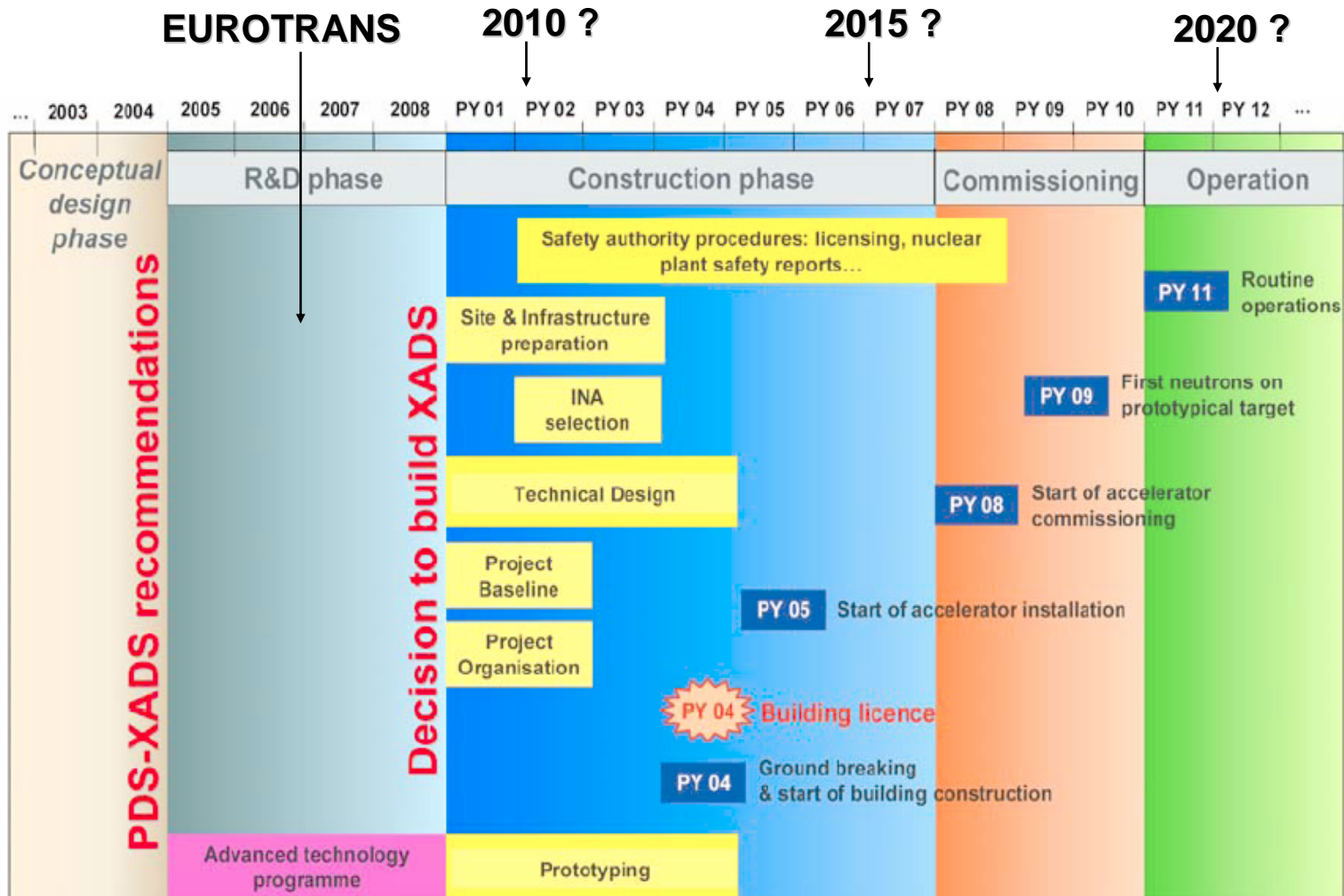
Stime di affidabilità

- Analisi standard per l'affidabilità eseguite sul disegno concettuale
 - Failure Modes and Effect Analysis (FMEA)** per individuare aree critiche con un approccio **bottom-up** (dai componenti al sistema)
 - Reliability Block Diagram (RBD)** per derivare (**top-down**) stime di affidabilità delle differenti configurazioni, al variare del grado di ridondanza e del livello previsto di tolleranza agli errori
- Utilizzo di tool commerciali

Mission Time	2190 hours
System MTBF	749.81 hours
Number of failures	2.92
Steady State Availability	99.3 %



oltre EUROTRANS



conclusioni

- Gli ADS possono giocare un ruolo importante nella transizione verso un nuovo ciclo di nucleare maggiormente sostenibile e non proliferante
 - Sicuramente per lo smaltimento del pregresso
 - Eventualmente, con GEN IV in azione, con una percentuale di sistemi dedicati alla riduzione veloce e efficace della massa scorie inviate ai depositi geologici
 - coesistenza di varie opzioni GEN IV, ADS e geological storage?
- Le maggiori attività tecnologiche di R&D per lo sviluppo degli ADS sono affrontate sia con il lavoro per i reattori GEN IV che con i programmi EURATOM
- *Il ruolo delle politiche nazionali e internazionali nella definizione degli scenari futuri è tutt'altro che scontato...*

Frédéric Joliot & Otto Hahn

The 2007 Frédéric Joliot & Otto Hahn

SUMMER SCHOOL ON NUCLEAR REACTORS " Physics, Fuels, and Systems "

Jointly organized by the "Commissariat à l'Energie Atomique" (France)
and the "Forschungszentrum Karlsruhe" (Germany)

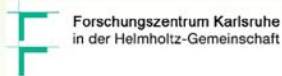
SUSTAINABILITY OF NUCLEAR ENERGY :
GEN-IV, PARTITIONING & TRANSMUTATION,
WASTE MANAGEMENT



Forschungszentrum Karlsruhe

Forschungszentrum Karlsruhe,
GERMANY

August 29 - September 7, 2007



convergenza

- Summer School FJOH
 - Prestigiosa scuola annuale organizzata congiuntamente tra il CEA e l'FZK
 - Corso del 2007 dedicato alla sostenibilità dell'energia nucleare
 - Affronta la gestione delle scorie sia attraverso GEN IV che gli scenari di P&T
 - Riconoscimento della possibilità di una sinergia tra le soluzioni per arrivare a un nuovo ciclo sostenibile e economicamente vantaggioso