

The ENEA logo features the word "ENEA" in a bold, white, sans-serif font. To the left of the text is a stylized graphic of a sun or starburst with rays emanating from a central point, set against a dark blue background.

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

# *Sicurezza Nucleare*

## *Studi e analisi di sicurezza e sostenibilità*

*Franca Padoani*

**ENEA**

*Laboratorio progettazione e supporto tecnico per la sicurezza e sostenibilità nucleare  
(PSSN)*

*Divisione Sicurezza e sostenibilità del nucleare (SICNUC)  
Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare (FSN)*

**Dati nucleari e librerie di sezioni d'urto**

**Metodi Monte Carlo e Deterministici per  
Analisi di Sicurezza Nocciolo**

**Metodi per verifiche di sostenibilità**

1. Produzione e Validazione di Librerie a Gruppi  
*M. Pescarini, R. Orsi, M. Frisoni*
1. Librerie di Dati di Decadimento Radioattivo  
*M. Frisoni*
1. Misure e Calcoli di Dati Nucleari di Base  
*S. Lo Meo, A. Ventura*

# 1 - Produzione e Validazione di Librerie a Gruppi



## *Librerie per Calcoli di Schermaggio e Danno da Radiazione*

### 1. Produzione e validazione di due librerie di sezioni d'urto multi-gruppo per reattori a fissione

- **BUGENDF70.BOLIB (PAR2012)** – Libreria di lavoro accoppiata n/y a gruppi larghi per applicazioni di schermaggio e danno da radiazione nei reattori ad acqua leggera (LWR). Trasferita per la libera distribuzione internazionale ad OECD-NEADB e ad ORNL-RSICC.
- **VITJEFF32.BOLIB (PAR2014)** – Libreria multi-purpose accoppiata n/y e stessa struttura a gruppi delle analoghe librerie americane VITAMIN-B6/7 (ORNL), specificamente raccomandata per applicazioni di schermaggio dalla normativa americana. VITJEFF32.BOLIB, è la controparte europea di VITAMIN-B7 generata in ENEA tramite la più recente versione sistema di processamento dati NJOY-2012.53.

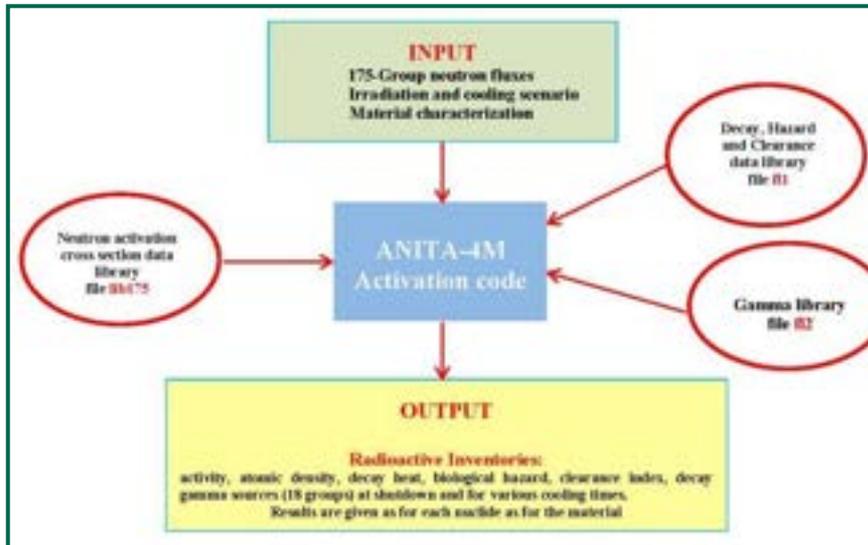
### 2. Validazione di tre librerie su benchmark PCA-Replica

- **PCA-Replica (PAR2013)** – Calcoli 3D di trasporto neutronico a sorgente fissa tramite codice deterministico TORT-3.2) sulla esperienza benchmark di schermaggio PCA-Replica ai fini validazione di tre librerie di sezioni d'urto di lavoro con stessa struttura a gruppi [BUGJEFF311.BOLIB (ENEA/JEFF-3.1.1), BUGENDF70.BOLIB (ENEA/ENDF/B-VII.0) e BUGLE-96 (ORNL/ENDF/B-VI.3)]. PCA-Replica (dal database SINBAD) è dedicata a verificare accuratezza dati e metodi di calcolo impiegati nello schermaggio e nella dosimetria del recipiente in pressione PWR.

## 2 - Librerie di Dati di Decadimento Radioattivo

### Produzione e Validazione Librerie di Dati di Decadimento - Sistema ANITA-2000

**ANITA-2000** è un «package» per calcoli di attivazione di materiali sottoposti ad irraggiamento neutronico rilasciato da ENEA ad OECD-NEADB e ORNL-RSICC, ampiamente utilizzato in ENEA per calcoli di inventario radioattivo e valutazioni di termini di sorgente per analisi di safety di impianti a fusione nucleare.



#### Il package comprende:

- il codice di attivazione ANITA-4M, basato sul codice originale sviluppato al CEC JRC Ispra
- due librerie di sezioni d'urto d'attivazione neutroniche (file lib175)
- libreria di dati di decadimento (file fl1)
- libreria (file fl2) contenente gli spettri dei raggi gamma di decadimento emessi dai nuclidi radioattivi.

I dati contenuti nelle librerie fl1 e fl2 sono basati sulla libreria di decadimento FENDL/D-2.0

- Sono state prodotte nuove librerie sulla base dei dati della più recente libreria valutata JEFF-3.1.1/RDD (Radioactive Decay Data Library).
- Le librerie aggiornate sono state validate tramite il confronto fra i risultati dei calcoli effettuati con il codice ANITA-4M ed i valori sperimentali di calore di decadimento ed attività misurati al Frascati Neutron Generator (FNG) dell'ENEA e al Fusion Neutronic Source (FNS) del Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI ora JAEA).

### *Attività di Misura in Ambito Esperimento Internazionale n\_TOF (CERN) e Calcolo di Dati Nucleari di Fissione*

- **Effetti di struttura nucleare nella fissione del plutonio (A. Ventura)**
- **Studio di modelli per il calcolo di sezioni d'urto di fissione alle energie neutroniche intermedie (100.0 MeV - 1.0 GeV) (S. Lo Meo, A. Ventura)**

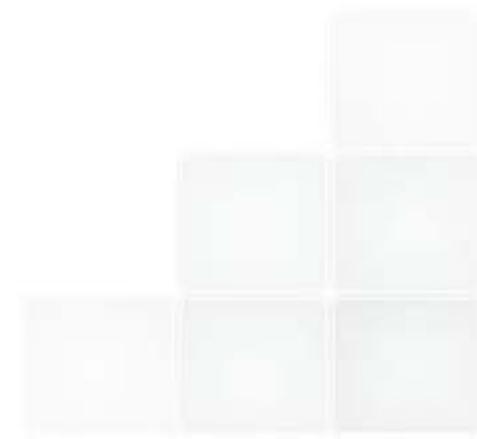
Utilizzo di simulazioni Monte Carlo con il codice INCLCascade per calcolare la fissione indotta da neutroni su bersagli costituiti da attinidi e pre-attinidi. L'energia dei neutroni e protoni, utilizzati nelle simulazioni, è compresa tra 100 MeV e 1 GeV.

- **Calcoli Monte Carlo (GEANT4) del flusso neutronico di spallazione generato da protoni di 20.0 GeV su un bersaglio di piombo dell'esperimento n\_TOF**

La produzione di neutroni e il loro trasporto all'interno del bersaglio di spallazione dell'esperimento n\_TOF è stata simulata utilizzando il codice Monte Carlo GEANT4. I risultati, ottenuti utilizzando diversi modelli d'interazioni nucleari alle alte energie, sono stati confrontati con le misure sperimentali.

**A. Metodi Monte Carlo per Analisi di Sicurezza Nocciolo**

**B. Metodi deterministici per Analisi di Sicurezza Nocciolo**



*Analisi di sicurezza di reattori ad acqua in pressione (PWR), Grossa taglia GenIII+*

Principali linee di progetto e di sviluppo dell'attività, a consulenza e supporto a IRSN:

- 1) Valutazione di prestazioni di rivelatori ex-nocciolo**
- 2) Analisi di sicurezza per transitori di potenza in avviamento (tilt del flusso)**
- 3) Calcoli in supporto alla progettazione di strumentazione elettronica monitoraggio sicurezza**

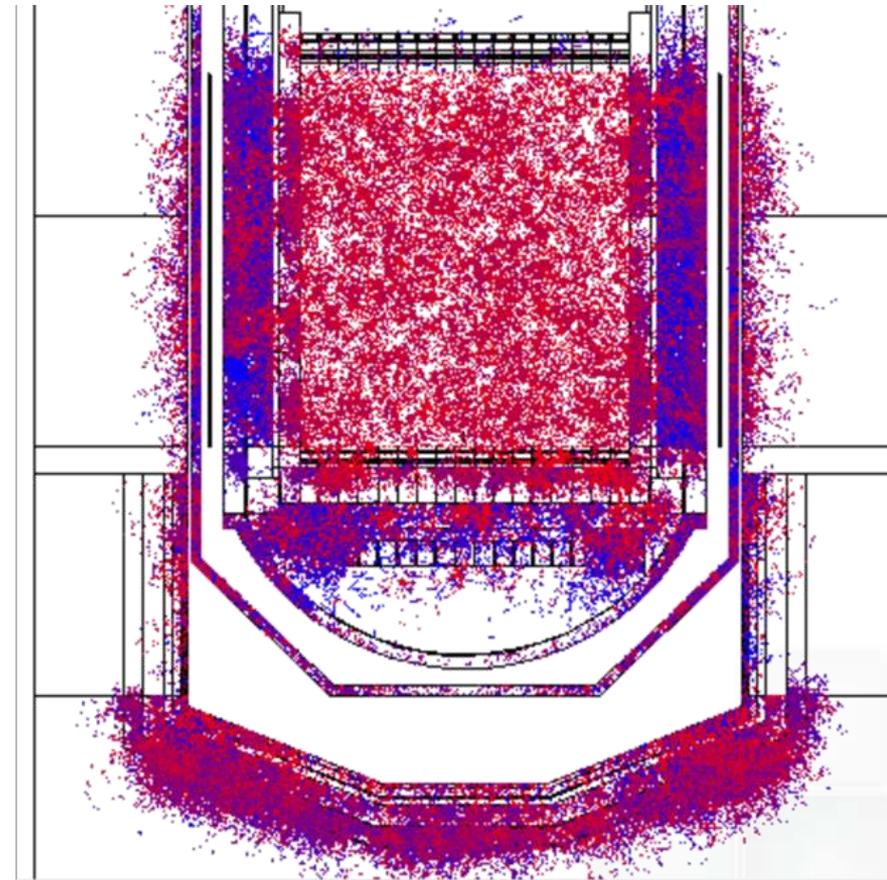
*Kenneth W. Burn, Patrizio Console Camprini*

## 1. Valutazione Prestazioni Rivelatori Ex-nocciolo

Studio dell'impatto del riflettore pesante (in acciaio) sulle prestazioni dei rivelatori posti all'esterno del nocciolo.

Le condizioni operative del reattore analizzate sono state le seguenti:

- Avviamento con sorgente standard  $^{252}\text{Cf}$
- Avviamento con sorgente Am-Be
- Condizioni nominali – flusso secondo distribuzione fondamentale



**Flusso ex-nocciolo: rivelatori e strumentazione**

## 2. Analisi sicurezza in Transitori di Avviamento (flux tilt)

Studio dell'impatto del riflettore pesante (in acciaio) sulle prestazioni di reattori in situazioni di avviamento e relativi transitori di potenza.

Tilt assiale / Tilt radiale:

- ottimizzazione della simulazione numerica
- valutazione e analisi di flussi neutronici

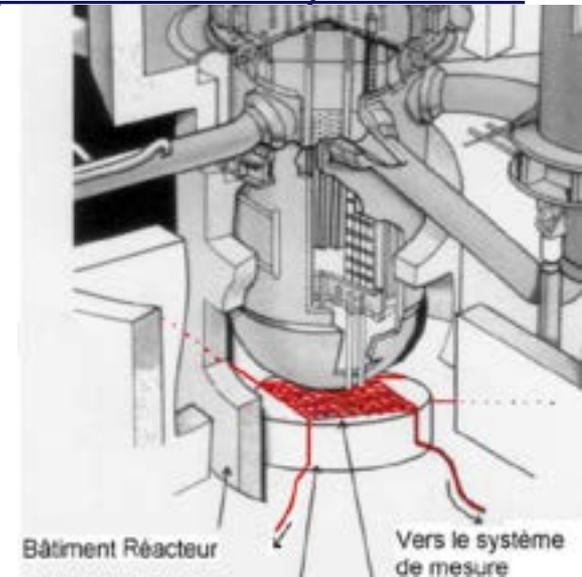
## 3. Progettazione strumentazione monitoraggio sicurezza

Progetto DISCOMS (IRSN-CEA-AREVA) per valutazione di irraggiamenti neutronici e gamma e relative dosi su strumentazione elettronica e cablaggi per monitoraggio nocciolo per sicurezza. Valutazioni sulla resistenza alla radiazione di strumentazione per rilevamento posizione di corium (nocciolo fuso) durante accadimento di incidente severo



*Test sperimentali di fusione del nocciolo (corium)*

*Rilevatori di corium  
(sotto il nocciolo)  
in reattori PWR  
grossa taglia*



Il principale obiettivo del triennio è stato di effettuare calcoli di safety di nocciolo con particolare riguardo all'impatto sui margini di sicurezza del tilt di potenza, utilizzando il codice di nocciolo CRONOS2 e il codice di cella APOLLO-2.

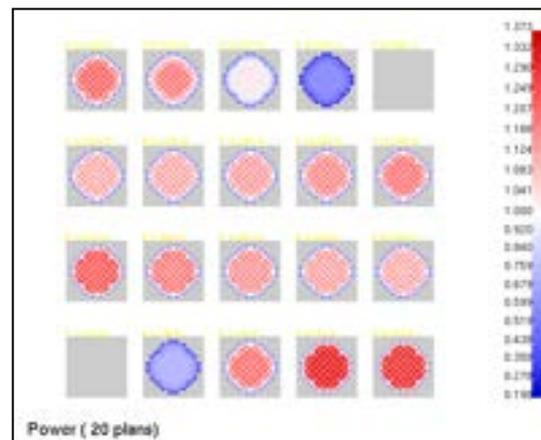
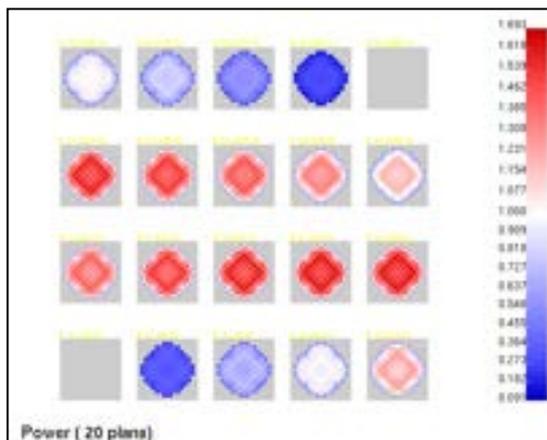
- 1. Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up di un PWR da 900MW (PAR 2012)**
- 2. Sezioni d'urto a due gruppi del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 1600 Mwe finalizzate a calcoli di safety di nocciolo (PAR 2013)**
- 3. Valutazioni dei fenomeni di tilt azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di sicurezza di nocciolo (PAR 2014)**

### 1. Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up di un PWR da 900MW (PAR 2012)

E' stata studiata la neutronica quasi-statica per condizioni operazionali (ovvero non incidentali) del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 900 MWe, con particolare riguardo ad aspetti relativi alla safety di nocciolo, quali:

- distribuzioni di temperatura;
- margini di sicurezza rispetto alle distribuzioni di flusso e di potenza;
- valore di antireattività dei sistemi di controllo.

I calcoli sono stati fatti col codice di nocciolo CRONOS2 usando le librerie di sezioni d'urto efficaci a due gruppi precedentemente calcolate con il codice di cella APOLLO2.



***Fattori di forma a inizio e fine ciclo.***

### 2. Sezioni d'urto a due gruppi del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 1600 Mwe finalizzate a calcoli di safety di nocciolo

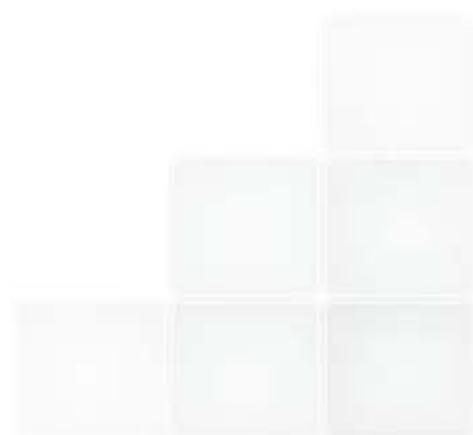
Per ogni tipo di assembly del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 1600 Mwe, sono state create 22 librerie di sezioni d'urto efficaci a due gruppi energetici facendo variare: temperatura del combustibile, densità del moderatore e concentrazione di boro. Ciascuna libreria ha una dimensione di circa 3 MB e ha richiesto circa 2 h di tempo; il numero di librerie complessivamente prodotte sono state 154. Tutte sezioni d'urto sono state calcolate con il codice di cella APOLLO2. l'attività è stata propedeutica ai calcoli di safety di nocciolo eseguiti con il codice CRONOS2 nella successiva annualità.

### 3. Valutazioni dei fenomeni di tilt azimutale in reattori PWR e del loro impatto sui margini di sicurezza di nocciolo (PAR 2014)

Utilizzando le librerie di sezioni d'urto efficaci prodotte nella precedente annualità e sfruttando l'esperienza di modellizzazione acquisita nella prima, si è voluto in quest'ultima valutare, per PWR da 1600 MWe, l'impatto sui margini di sicurezza di nocciolo del tilt di potenza, fenomeno presente in alcune configurazioni di PWR, che riguarda la differenza relativa tra la potenza media di un quadrante e un quarto della potenza complessiva prodotta dall'intero nocciolo. Scopo dello studio è stato quello di dimostrare che attraverso la misura del valore di antireattività differenziale delle barre di controllo (nei reattori che non prevedono misure dirette) è possibile fornire una stima del tilt (metodo indiretto) a bassi valori di potenza.

**Aspetti che interessano trasversalmente aree essenziali e imprescindibili per le attività nucleari nazionali residue**, incluso lo sviluppo di reattori di nuova generazione, e che sono alla base della politica nazionale e internazionale italiana in materia di sicurezza e non proliferazione.

- 1. Resistenza alla proliferazione**
- 2. Nuclear Security e interfaccia safety-security**
- 3. Sostenibilità del ciclo del combustibile**



# 1. Resistenza alla proliferazione



## **Partecipazione ai gruppi di lavoro GIF Proliferation Resistance and Physical Protection (PR&PP-WG) e IAEA-INPRO (collaborative research project PROSA)**

- I due manuali di riferimento sono quelli del PR&PP WG del GIF e di IAEA-INPRO (per quest'ultimo è tuttavia prevista una revisione). Le due metodologie hanno diversità di obiettivi e di utenti: più "politica" quella di INPRO e più "tecnica" quella del GIF. Le due comunità di esperti GIF e INPRO di esperti hanno a lungo considerato la possibilità di una loro armonizzazione, giungendo alla conclusione che è più opportuno parlare di complementarietà.

## **Applicazione della metodologia GIF PR&PP a reattori di nuova generazione**

- Le applicazioni sono sempre più numerose, quale quella di Fabiana Rossi (presso la Japan Atomic Energy Agency-JAEA) ad un sistema composto da un ipotetico reattore commerciale di IV generazione raffreddato a sodio.

## 2. Nuclear Security

### Partecipazione al Nuclear Security Summit process

- L'architettura globale di Nuclear Security è stata profondamente rimodellata in questi anni grazie al processo NSS e considerevoli risultati positivi sono stati conseguiti. Come mantenere alta l'attenzione internazionale e, soprattutto, come mantenere alto l'impegno dei governi dei paesi che fanno parte del processo NSS nel dopo 2016, è una delle grandi questioni che verranno affrontate dai Capi di Stato al prossimo NSS di Washington.



- L'Italia ha sponsorizzato all'Aia nel 2014 il Gift Basket "Nuclear Security Training and Support Centres / Centres of Excellence - NSSC/CoE", sottoscritto da 32 paesi, per promuovere lo sviluppo di centri di formazione nel campo della security nucleare e il loro networking. ENEA è stata designata ad implementarlo → **High-Level Event, Bologna 7-8 maggio 2015**

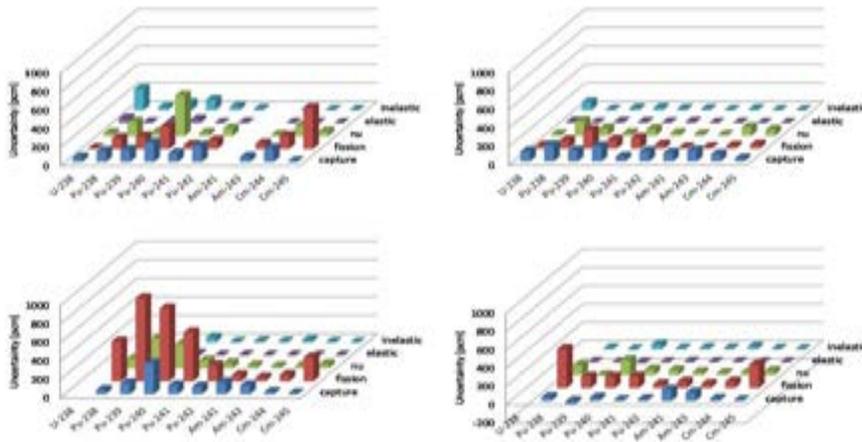
### Partecipazione alle attività IAEA

- Le attività IAEA per la nuclear security sono in continuo aumento, anche per via del maggior ruolo che le viene riconosciuto a livello internazionale, anche in termini di coordinamento: Servizi, Forensic, Cybersecurity, NSSC Network, INSEN, Nuclear Security Guidance Committee, interfacce safety-

# 3. Sostenibilità del ciclo del combustibile

## Studi e analisi svolti a livello internazionale in collaborazione con OECD/NEA e IAEA

- Sviluppo di metodologie e relativi modelli sulle problematiche relative alle incertezze delle variabili/osservabili del ciclo del combustibile (Expert Group on Advanced Fuel Cycle Scenarios dell'OECD/NEA)
- Relativamente alla chiusura del ciclo, preparazione di un programma internazionale sperimentale per la riduzione delle incertezze dei dati di nucleari di base, Attinidi Minori e non solo (Expert Group on MA Management dell'OECD/NEA)



*Diversi contributi alle incertezze sul k-eff in un Sodium Fast Reactor*

- L'ENEA contribuisce fin dal 2007 all'Iniziativa dell'IAEA Fast Reactors Knowledge Preservation Initiative (FRKP) che promuove la creazione di un database che raccoglie le informazioni fornite su base volontaria da diversi Stati membri sulle loro esperienze in materia di reattori veloci.

# 3. Sostenibilità del ciclo del combustibile

## Sostenibilità economica ed ambientale: scenari energetici

- Ai fini della sostenibilità economica ed ambientale della produzione di energia elettrica, è stata studiata, con l'Università di Padova, l'interconnessione tra la scelta di diversi mix di fonti, i rispettivi valori medi di emissioni di CO2 ed i costi di generazione ed è stata sviluppata una metodologia innovativa.

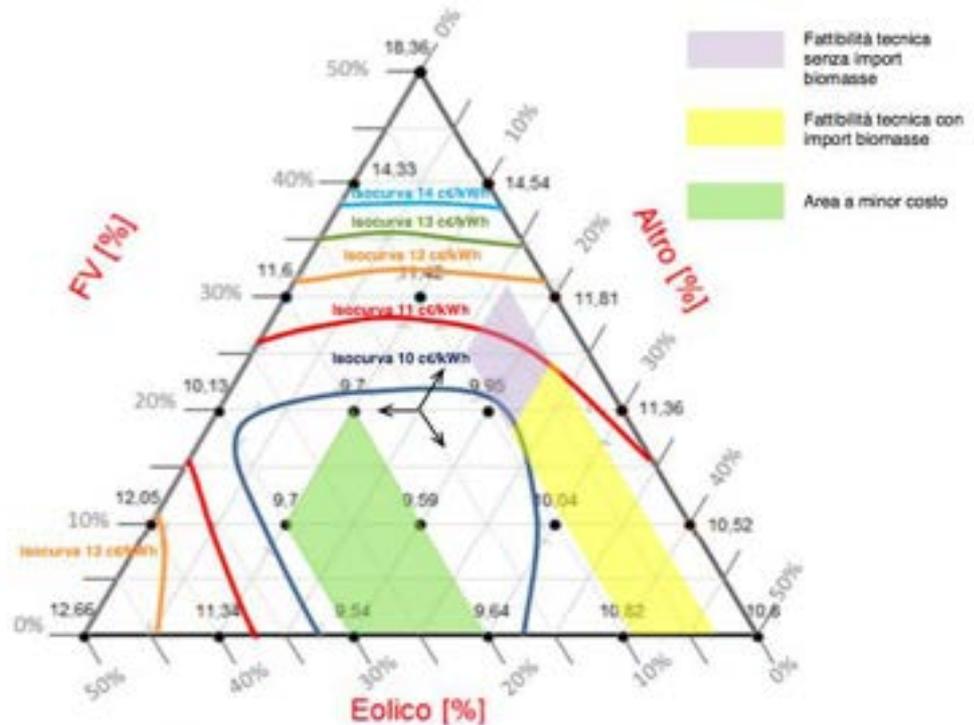


Figura 15. Rappresentazione grafica dei mix 50% FER al 2030 ed LCE relativi.

## Accettabilità sociale e Indicatori

- Nel quadro della ricerca di nuovi possibili indicatori per la sostenibilità del ciclo del combustibile, si è, tra l'altro, confrontata la radiotossicità a lungo termine dei rifiuti del combustibile con quella di ampi volumi di terreno attorno al deposito geologico.

*Grazie*



***REATTORI DI IV GENERAZIONE E SICUREZZA NUCLEARE,  
Roma, 11 settembre 2015***