



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

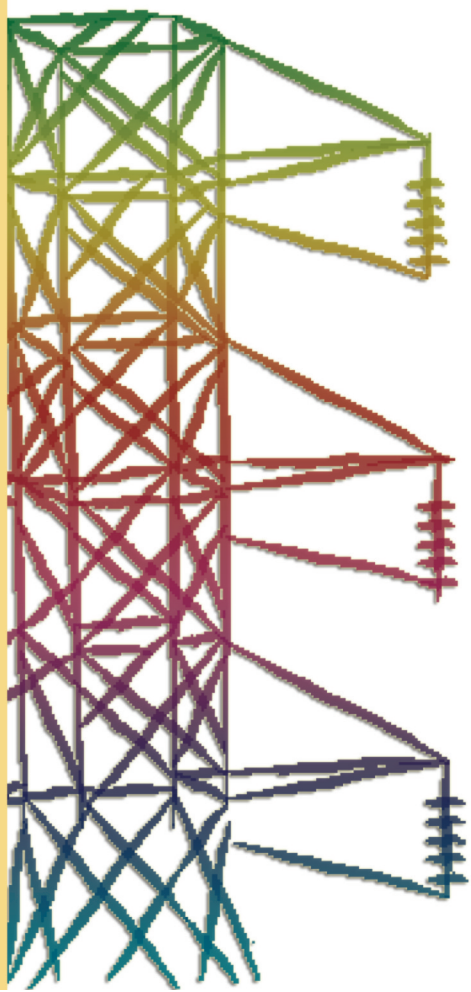


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi innovativi: sviluppo e applicazione

Franca Padoani





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione di
sistemi innovativi: sviluppo e applicazione

Franca Padoani

METODOLOGIE PER LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA PROLIFERAZIONE DI SISTEMI
INNOVATIVI: SVILUPPO E APPLICAZIONE

Franca Padoani (ENEA)

Febbraio 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

Sommario

Il rapporto fa il punto sullo sviluppo e applicazione delle metodologie internazionali attualmente in atto per valutare la resistenza alla proliferazione di sistemi innovativi: le metodologie in ambito INPRO (iniziativa IAEA) e GIF, tramite il *Proliferation Resistance & Physical Protection Working Group*.

Il rapporto descrive le due linee di attività su cui è attualmente impegnato il gruppo GIF PR&PP: la finalizzazione di un caso studio su un ipotetico sistema innovativo usato per testare la metodologia: e la futura applicazione della metodologia a sistemi GenIV.

Il sistema utilizzato come caso studio è un ipotetico reattore veloce raffreddato a sodio (ESFR) assieme ad una porzione di ciclo del combustibile. La resistenza alla proliferazione è stata valutata a fronte di quattro scenari: diversione, uso improprio degli impianti e processi, furto di materiale e infine dichiarata volontà di uno stato di dotarsi di armi nucleari. Sono state considerate varie configurazioni del nocciolo del ESFR per valutare la sensibilità della metodologia. L'ENEA ha cominciato la valutazione di una di queste configurazioni; i risultati sono attesi per i primi mesi del 2009.

Per l'utilizzo della metodologia in tutti i sistemi GenIV, una volta che questa si sia dimostrata affidabile e robusta, è fondamentale che i progettisti dei vari sistemi familiarizzino il prima possibile con la metodologia: solo in questo modo sarà possibile inserire già nelle primissime fasi di progetto quegli elementi che ne aumenteranno le caratteristiche di non proliferazione nel modo più efficiente e meno costoso. Per facilitare questo processo, si sono creati recentemente dei team tra i membri del gruppo di lavoro PR&PP e degli *steering committees* dei vari sistemi (SSC): il primo compito sarà la caratterizzazione dei sistemi in termini di non proliferazione e protezione fisica. L'ENEA fa parte del team che si occupa del LFR; il contributo continuerà e si intensificherà nel 2009.

Si noti che il processo di applicazione della metodologia è necessariamente evolutivo dato che i progetti sono ancora tutti in una fase iniziale e con molte opzioni ancora aperte, ad esempio sul tipo del combustibile; opzioni che si ripercuotono sul ciclo del combustibile associato e quindi sulle valutazioni di resistenza alla proliferazione. La valutazione dovrà tenere il passo con gli sviluppi dei sistemi; lo scopo è che ad ogni fase si traggano insegnamenti da introdurre a livello del sistema, misure di verifica/salvaguardie, sorveglianza e procedure.

Indice

1	Introduzione	4
2	Metodologie	5
2.1	Definizioni	6
3	INPRO: resistenza alla proliferazione e protezione fisica	7
4	Generation IV International Forum: il PR&PP Working Group.....	9
4.1	Caso Studio ESFR	12
4.1.1	Caso Studio 2005-2006	12
4.1.2	Caso Studio 2007-2008	13
4.2	Applicazione ai sistemi Gen IV	13
5	“Salvaguardabilità”	15
6	Attività ENEA	17
7	Conclusioni.....	18

1 Introduzione

“I benefici dell’energia nucleare sono concreti e pratici. Ma un grave rischio si accompagna al suo impiego pacifico: quello che componenti del processo per l’utilizzo di questa fonte energetica vengano destinati alla produzione di armi nucleari”. Questa è una dichiarazione di più di 10 anni fa dell’allora Presidente degli Stati Uniti Jerry Carter e rispecchia una realtà con cui il mondo politico internazionale si sta confrontando dagli inizi dell’era nucleare.

Il rischio di una proliferazione incontrollata di ordigni nucleari ha condotto ad una serie di trattati e di accordi internazionali, in particolare il Trattato di Non proliferazione (TNP) e il Trattato per il Bando Totale degli esperimenti Nucleari (CTBT - *Comprehensive Test Ban Treaty*). Il TNP, entrato in vigore nel 1968 e cui aderiscono attualmente 188 paesi, stabilisce un quadro di riferimento per regolare il commercio internazionale di materiali, tecnologie, impianti destinati alle applicazioni pacifiche dell’energia nucleare, e per assicurare controlli e salvaguardie atti ad evitare la proliferazione nucleare “orizzontale”, ossia l’aumento del numero di paesi dotati di capacità nucleari militari. Mentre ai cinque paesi (Stati Uniti, Unione Sovietica - oggi Russia -, Regno Unito, Francia e Cina) che alla entrata in vigore del TNP avevano già acquisito una capacità nucleare militare, viene chiesto di impegnarsi in negoziati per porre fine, appena possibile, alla corsa agli armamenti nucleari (proliferazione “verticale”) e perseguire l’obiettivo del disarmo nucleare totale, a tutti gli altri paesi membri il Trattato offre cooperazione per favorire le applicazioni pacifiche del nucleare. La controparte in questo caso è l’impegno a non utilizzare l’energia nucleare a fini militari: la AIEA, tramite la stipula di accordi di salvaguardia svolge il ruolo di controllore.

A quarant’anni di distanza, si sono aggiunti India, Pakistan e Nord Corea che hanno effettuato apertamente test nucleari e Israele che, seppure non abbia mai confermato o smentito, è riconosciuto come potenza nucleare. Oltre a questi si devono poi considerare i 20-30 paesi che secondo il Direttore Generale dell’IAEA, Mohamed El Baradei, in pochi anni avranno, volendolo, la capacità di dotarsi di armi nucleari in tempi molto brevi¹.

Con l’espandersi del numero di paesi interessati a iniziare programmi nucleari civili, il rischio della proliferazione orizzontale sembra destinata a crescere, in particolare con la disseminazione delle tecnologie “sensibili”², cioè quelle legate all’arricchimento del combustibile fresco e al riprocessamento di quello esaurito. I casi dell’India, Iran e della Corea del Nord ne sono la riprova.

Più recentemente, il rischio terrorismo è emerso in proporzioni prima sconosciute. Anche se non specifico o dipendente dallo sviluppo di programmi energetici nucleari, tuttavia il rischio derivante da furto o sabotaggio di materiali nucleari o impianti nucleari è tale da non poter essere trascurato. Come si vedrà, le metodologie per valutare la sicurezza di impianti nucleari o, più globalmente, di cicli del combustibile nucleare, considerano sia aspetti di non proliferazione che di protezione fisica.

¹ Discorso Introduttivo al “*Symposium on International Safeguards: Addressing Verification Challenges*”, Vienna, 16-20 ottobre 2006

² G. Cicognani e F. Padoani “Combustibili nucleari e proliferazione”, Sapere, Agosto 1987

Nel contesto internazionale attuale, le misure prese in considerazione per ridurre i rischi di proliferazione orizzontale sono di varia natura, tra queste:

- il potenziamento dei controlli internazionali dell’AIEA attraverso l’adozione obbligatoria del Protocollo Aggiuntivo (*Additional Protocol*),
- una maggiore efficacia e trasparenza nei controlli sulle esportazioni di materiali, tecnologie e impianti;
- il potenziamento dei programmi e misure per la protezione del materiale nucleare e tecnologia nucleare, come l’entrata in vigore degli Emendamenti alla Convenzione sulla Protezione Fisica;
- un nuovo approccio internazionale o multinazionale al ciclo del combustibile, ad esempio la *Global Nuclear Energy Partnership* (GNEP) e la Banca del Combustibile sotto l’egida AIEA, per porre un freno alla diffusione delle tecnologie “sensibili”;
- lo sviluppo di cicli del combustibile caratterizzate da un’elevata resistenza alla proliferazione.

Il presente rapporto fa riferimento a quest’ultimo aspetto, in particolare a come sia possibile effettuare una valutazione qualitativa e quantitativa della resistenza alla proliferazione di cicli del combustibile; valutazione essenziale per dare ai decisori politici gli strumenti di scelta.

2 Metodologie

Uno dei risultati della dichiarazione di Carter fu la promozione da parte AIEA di un programma di valutazione del ciclo del combustibile nucleare e relative tecnologie, con lo scopo di valutare i rischi di proliferazione e di individuare le misure più idonee per garantire lo sviluppo pacifico dell’energia nucleare. Il programma, denominato INFCE (*International Nuclear Fuel Cycle Examination*), si concluse nel 1980, costituendo una solida base di riferimento per gli studi futuri. Il risultato di questi primi studi fu che le misure tecniche risultavano efficaci contro il rischio di furto e sabotaggio mentre avevano un’influenza limitata sulla riduzione del rischio di proliferazione, per il quale erano essenziali misure di salvaguardia e istituzionali. La conclusione che non esistano cicli del combustibile a prova di rischio di proliferazione nucleare è ancora valida e ormai si da per assodato che lo sforzo debba essere rivolto ad incrementare la resistenza alla proliferazione, non ad eliminare il rischio.

Gli studi sulla resistenza alla proliferazione hanno avuto una nuova enfasi in particolare in relazione agli studi sull’utilizzo del plutonio in eccesso e alla cooperazione con la Russia in campo di non proliferazione alla fine degli anni ’90. Ad esempio, TOPS³ (*Technical Opportunities to Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems*) che ha esplorato la possibilità di aumentare la resistenza alla proliferazione con

³ Tops Task Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee, “*Technological Opportunities To Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPS)*”, US Department of Energy (DOE) (Jan. 2001)

mezzi tecnici, o il *Blue Ribbon Panel of the Advanced Fuel Cycle Initiative* che ha concluso nel 2004 l'esame della resistenza alla proliferazione di alcuni cicli del combustibile con reattori ad acqua leggera.

Tuttavia è soprattutto con lo studio di sistemi nucleari (i.e. reattori nucleari e associato ciclo del combustibile) innovativi e di reattori di nuova generazione che si è avuto un nuovo impulso. Le due iniziative internazionali attualmente in corso sono l'*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles* (INPRO) nato in ambito IAEA e il *Proliferation Resistance & Physical Protection (PR&PP) Expert Group* creato all'interno del *Generation IV International Forum (GIF)*.

2.1 Definizioni

Una delle difficoltà incontrate nello sviluppo di metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione è stata la mancanza di una definizione generalmente accettata di resistenza alla proliferazione. Con l'obiettivo di trovare un punto di partenza comune, la IAEA ha pubblicato nel 2002 il rapporto "*Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems*"⁴, risultato del meeting organizzato a Como nel 2002 in collaborazione con il Centro Volta – Landau Network.

Definizioni

Dal rapporto AIEA "Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems"

La Resistenza alla Proliferazione è definita come quella caratteristica di un sistema di energia nucleare che impedisce la diversione o produzione non dichiarata di materiale nucleare, o l'uso improprio della tecnologia, da parte di stati intenzionati ad acquisire armi nucleari o altri dispositivi esplosivi nucleari.

Le caratteristiche intrinseche sono quelle caratteristiche che derivano dal progetto tecnico, ad esempio i sistemi energetici nel cui ciclo del combustibile non vi è mai plutonio separato. Sono comprese anche le misure che facilitano l'esecuzione di misure estrinseche, ad esempio quelle che facilitano l'applicazione delle verifiche di salvaguardia.

Le misure estrinseche di Resistenza alla Proliferazione sono quelle misure che derivano dalle decisioni degli Stati e fatte relativamente ai sistemi nucleari di energia, ad esempio, l'accettazione del Protocollo Aggiuntivo e l'adozione di misure di controllo per il materiale nucleare.

La Protezione Fisica è intesa come la caratteristica che impedisce il furto di materiale, utilizzabile in dispositivi nucleari esplosivi oppure in dispositivi di dispersione di radiazione, e il sabotaggio di impianti e trasporti da parte di entità sub-nazionali o altri avversari esterni allo Stato.

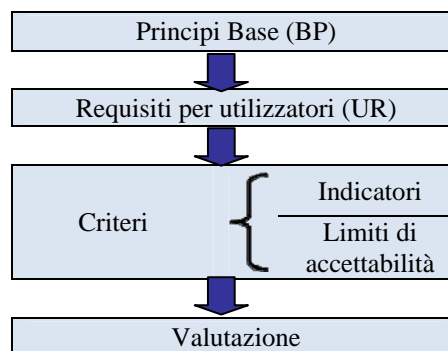
⁴ IAEA STR-332, Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems, December 2002

Queste definizioni sono necessarie per giungere alla quantificazione della resistenza alla proliferazione in base a criteri accettati formalmente da tutta la comunità, a livello nazionale e internazionale. Su queste poggiano le metodologie sviluppate nell'ambito di INPRO e PR&PP.

3 INPRO: resistenza alla proliferazione e protezione fisica

INPRO è un'iniziativa IAEA del 2001 nata per sviluppare una metodologia che valutasse olisticamente i sistemi nucleari innovativi (*Innovative Nuclear Systems*, INS). La resistenza alla proliferazione e protezione fisica è uno degli aspetti considerati assieme a sostenibilità, economia, ambiente, sicurezza (safety) e gestione dei rifiuti radioattivi. L'approccio metodologico della valutazione in INPRO è comune a tutte questi aspetti.

La metodologia INPRO si basa su una struttura gerarchica *top-down* composta da principi base (PB), requisiti per gli utilizzatori (UR) e criteri che devono essere soddisfatti dai sistemi nucleari innovativi. I criteri comprendono indicatori, parametri di valutazione e limiti di accettabilità che sono utilizzati durante la valutazione per decidere se un criterio è stato soddisfatto o meno. La valutazione, *bottom-up*, consiste nel confronto di indicatori e relativi limiti di accettabilità e nella capacità di un sistema di soddisfare criteri e requisiti.



Per quanto attiene alla resistenza alla proliferazione, un aspetto che contraddistingue questa metodologia è che considera le condizioni specifiche di un paese e ha come focus il possibile contributo di un sistema energetico innovativo ad un potenziale programma nucleare militare di questo paese. La valutazione considera l'intero ciclo del combustibile non solo elementi di esso (ad es. il reattore). Lo scopo della valutazione è, oltre a giudicare se è stato raggiunto il desiderato livello di resistenza alla proliferazione, quello di fornire una guida agli sviluppatori su come aumentare tale resistenza.

A livello di stato, elementi importanti per la valutazione della resistenza alla proliferazione sono l'attuazione delle misure istituzionali o internazionali indicate nell'Introduzione, ad es. l'adozione del Protocollo Aggiuntivo o un approccio multilaterali al ciclo del combustibile.

A livello di impianti, le caratteristiche rilevanti in termini di resistenza alla proliferazione sono, ad esempio, il tipo di materiale (materiale per ordigni nucleari, irraggiato o no), la

‘sensibilità’ delle tecnologie (arricchimento o ritrattamento), la facilità di trafugare o produrre illegalmente materiale nucleare, i sistemi di misura adottati per le salvaguardie, l’accesso agli ispettori e la possibilità di monitoraggio remoto.

La resistenza alla proliferazione deriva dalla combinazione di tutti questi elementi. Nel 2007 è stata pubblicata l’ultima versione del Manuale d’Uso di INPRO per la resistenza alla proliferazione⁵ e per la protezione fisica⁶. Questa nuova versione contiene alcuni importanti modifiche intese a enfatizzare l’importanza delle misure intrinseche e estrinseche, in particolare vi è un solo Principio Base che recita:

PB1: “Le caratteristiche intrinseche di resistenza alla proliferazione e le misure estrinseche dovranno essere presenti durante l’intero ciclo di vita dei sistemi energetici nucleari innovativi per aiutare a garantire che i sistemi stessi possano continuare ad avere scarsa forza di attrazione per l’acquisizione di materiale fissile per un programma nucleare militare. Le caratteristiche intrinseche e le misure estrinseche sono entrambe essenziali e, presa separatamente, nessuna delle due dovrà essere considerata sufficiente”.

Da questo Principio Base discendono cinque Requisiti per gli Utilizzatori (UR1-5):

<i>Requisiti per utilizzatori</i>			<i>Indicatori</i>
UR1	Impegno dello stato	Gli impegni, obblighi e politiche degli Stati riguardanti la non proliferazione e la loro attuazione dovrebbero essere adeguati e rispondere agli standard internazionali in materia di non proliferazione.	Gli impegni, obblighi e politiche riguardanti la non proliferazione sono stati attuati dallo stato?
			Sono stati considerati provvedimenti strutturali da parte dello stato?
UR2	Forza di attrazione del materiale e della tecnologia	Il materiale nucleare e la tecnologia nucleare dovrebbero esercitare scarsa forza di attrazione per un programma nucleare militare. Si intende incluso anche il materiale nucleare non dichiarato che potrebbe credibilmente essere prodotto o processato.	Qualità del materiale
			Quantità del materiale
			Forma fisica del materiale
			Tecnologia nucleare
UR3	Difficoltà di trafugamento e facilità di rilevarlo	La diversione del materiale nucleare dovrebbe essere ragionevolmente difficile e rilevabile. La diversione include l'uso di impianti per la produzione o processamento di materiale nucleare non dichiarato.	Contabilità
			Disponibilità di misure di Contenimento/sorveglianza e monitoraggio
			Possibilità di rilevare materiale nucleare
			Difficoltà a modificare i processi
			Difficoltà a modificare gli impianti
			Possibilità di rilevare l’uso illecito di tecnologia o impianti
UR4	Barriere multiple	I sistemi di energia nucleare innovativi dovrebbero incorporare misure e caratteristiche di resistenza alla proliferazione multiple.	Misura in cui il sistema è coperto da caratteristiche intrinseche e misure estrinseche multiple
			Robustezza delle barriere per ogni percorso di acquisizione di materiale.

⁵ IAEA-TECDOC-1575, “Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems INPRO Manual —Proliferation Resistance, Volume 5”, ottobre 2007

⁶ IAEA-TECDOC-1575, “Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems INPRO Manual —Physical protection, Volume 6”, ottobre 2007

UR5	Ottimizzazione del progetto	La combinazione delle caratteristiche intrinseche e delle misure estrinseche, compatibili con altre considerazioni di progetto, dovrebbero essere ottimizzate per rendere la resistenza alla proliferazione efficiente in termini di costi.	Misure di resistenza alla proliferazione adottate fin dalle prime fasi di progetto
			Costo minimo totale sull'intera vita del ciclo del sistema nucleare innovativo per incorporare le caratteristiche intrinseche e misure estrinseche applicate per aumentare la resistenza alla proliferazione.
			Approccio alle verifiche e livello di misure estrinseche concordato tra le autorità per le verifiche e lo stato.

La nuova metodologia è stata applicata al ciclo del combustibile DUPIC (*Direct use of PWR spent fuel in CANDU reactors*) per valutarne l'adeguatezza⁷. La conclusione è stata che nonostante la metodologia sia molto utile per capire gli aspetti di non proliferazione di un sistema e sia un significativo passo in avanti, non è tuttavia in grado di fornire una valutazione quantitativa della resistenza alla proliferazione. In particolare viene suggerito lo sviluppo di un metodo quantitativo addizionale, sia per i decisori politici che per i progettisti per aiutarli a valutare i sistemi nucleari innovativi sulla base della loro resistenza alla proliferazione e per identificare opzioni tecniche per aumentarla.

4 Generation IV International Forum: il PR&PP Working Group

Il *Proliferation Resistance & Physical Protection Expert Group* (PR&PP) è un gruppo di lavoro internazionale organizzato nel 2002 in ambito GIF seguendo la raccomandazione della *Generation IV Roadmap*. La Roadmap identificava la resistenza alla proliferazione e la protezione fisica (PR&PP) come uno dei quattro obiettivi tecnologici dei sistemi GenIV, assieme a sostenibilità, sicurezza (safety) & affidabilità e aspetti economici. La definizione dell'obiettivo PR&PP è:

“I reattori GenIV dovranno essere la via meno interessante e desiderabile ai fine della diversione o furto di materiali utilizzabili per ordigni nucleari e uso illecito della tecnologia, e dovranno presentare un'aumentata protezione contro atti di terrorismo.”

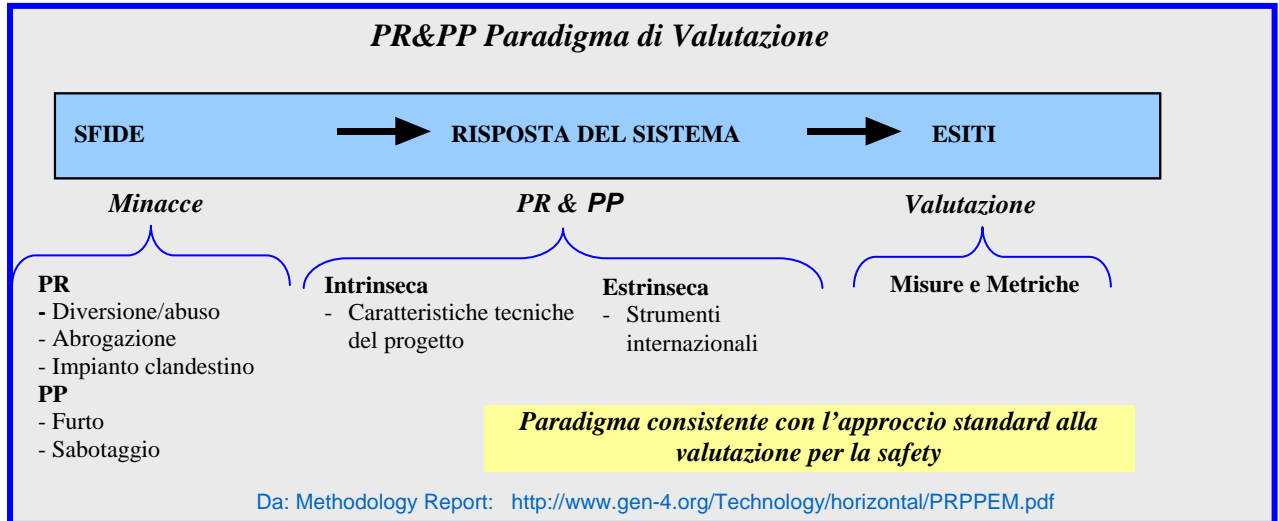
Il mandato del gruppo di esperti PR&PP è di sviluppare una metodologia per la valutazione di sistemi innovativi GenIV in termini di resistenza alla proliferazione (PR) e protezione fisica (PP). Lo scopo è di sviluppare separatamente le misure per definire PR e PP, mettendo tuttavia a punto una metodologia che consideri congiuntamente PR e PP nella valutazione dei sistemi di GenIV. Il gruppo di esperti include i membri di GIF e l'IAEA. EURATOM, rappresentato dalla Commissione Europea è un membro di GIF. A partire da dicembre 2007, anche un esperto italiano dell'ENEA, attraverso EURATOM, fa parte del gruppo PR&PP.

L'ultima versione della metodologia è stata pubblicata a novembre 2006⁸ ed è reperibile nel sito di Gen-IV.

⁷ J.H.Park et al. “*Revised INPRO Methodology in the Area of Proliferation Resistance*”, ESARDA Bulletin N°39, ottobre 2008, ISSN 0392-3029

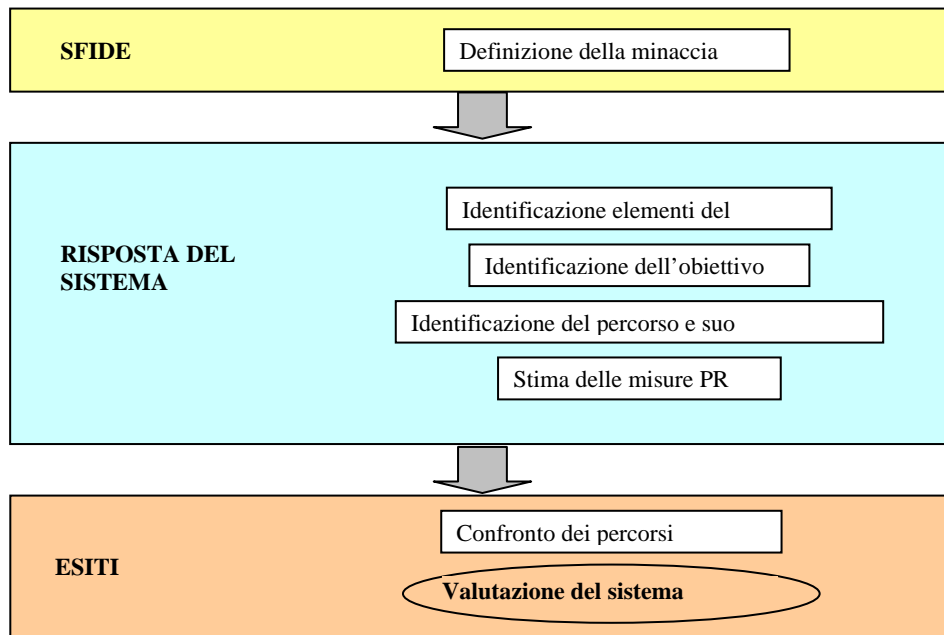
⁸ PR&PP WG “*Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems- Revision 5*”, GIF/PRPPWG/2006/005, 30 novembre 2006

In termini generali, la metodologia si basa su scenari e, per ogni sistema (ciclo del combustibile o parti di esso), viene definita una serie di minacce, si analizza la risposta del sistema alla minaccia e si valutano i risultati.



In termini di minaccia, si considera che essa provenga dallo stato che ospita il sistema nucleare per quanto riguarda la resistenza alla proliferazione; mentre ci si riferisce a gruppi terroristici (o comunque ostili allo stato) nella valutazione della protezione fisica. Si noti che la metodologia si basa su una data minaccia e non si esprime sulla probabilità o meno che possa concretizzarsi. Inoltre la definizione della minaccia varierà a seconda del livello di definizione del sistema nucleare e sarà necessariamente più grossolana nelle prime fasi del progetto. La caratteristica di poter effettuare valutazioni in varie fasi di definizione di un sistema nucleare, è uno degli elementi rilevanti della metodologia.

Lo schema seguente esplicita meglio la risposta del sistema che è suddivisa in quattro fasi: l'identificazione degli elementi del sistema, l'identificazione degli obiettivi e loro caratterizzazione, l'identificazione dei percorsi e la stima delle misure.



L'identificazione degli elementi del sistemi sarà tanto più dettagliata quanto più lo sarà il progetto e così di seguito per l'identificazione dell'obiettivo (es. materiale nucleare, impianti, informazioni), possibili percorsi (cioè sequenze di eventi per arrivare all'obiettivo) e infine l'espressione della risposta del sistema in termini di misure di PR e PP. Le misure per valutare PR e PP sono:

RESISTENZA ALLA PROLIFERAZIONE – PR	
<i>Caratteristiche Intrinseche</i>	<i>Caratteristiche Estrinseche</i>
Difficoltà tecniche (DT) Costo (PC) Tempo (PT) Tipo di materiale fissile (MT)	Probabilità di rilevamento (DP) Efficienza nel rilevamento (DE)
PROTEZIONE FISICA - PP	
Probabilità di successo dell'avversario (PAS) Conseguenze (C) Risorse per la protezione fisica (PPR)	

La metodologia consente quindi di effettuare una valutazione fin dalle prime fasi del progetto, diventando sempre più dettagliata man mano che il progetto evolve, con grande flessibilità. In questo modo è anche possibile identificare le sinergie e potenziali conflitti tra i requisiti per PR&PP e quelli per safety e affidabilità. Questo permette di identificare preventivamente eventuali azioni correttive, evitando interventi a impianto già costruito.

4.1 Caso Studio ESFR

4.1.1 Caso Studio 2005-2006

La metodologia, prima del rilascio della revisione 5, è stata testata su un caso studio (*Demonstration Case Study*)⁹ basato su un ipotetico reattore veloce raffreddato a sodio, denominato *Example Sodium Fast Reactor – ESFR*. L'ESFR consiste di quattro unità di taglia media (300MWe l'una). Le unità sono co-locate con alcuni impianti del ciclo del combustibile, tra cui un impianto di riprocessamento pirochimico.

Il gruppo di esperti ha utilizzato tre diversi approcci - qualitativo, alberi logici (albero degli errori e albero degli eventi) e modello Markoviano – seguendo il paradigma della metodologia: definizione della minaccia → valutazione della risposta del sistema → risultati. Questo primo test sul caso studio si è svolto nel 2005-2006 e può essere considerato ancora come parte dello sviluppo della metodologia.

Il quadro di riferimento considerava una minaccia di diversione da parte di uno stato, con preesistenti reattori nucleari e relative infrastrutture, aderente al TNP e con il protocollo Aggiuntivo già in vigore. Lo scopo della diversione era il trafugamento di materiale nucleare corrispondente ad una Quantità Significativa¹⁰ in un anno. Il gruppo ha considerato solo una parte del ciclo del combustibile dell'ESFR, in particolare l'impianto pirometallurgico. In termini di misure di salvaguardie, sono stati considerati contatori neutronici, videocamere, sigilli e i sistemi di contabilità.

Per valutare la risposta del sistema, il sistema è stato suddiviso in elementi e, all'interno di questi, sono stati evidenziati i potenziali obiettivi che, seguendo opportune strategie (o percorsi), fossero in grado di soddisfare lo scopo della diversione (cioè 1 QS in un anno). Su queste basi è stata valutata la risposta del sistema in termini delle misure PR indicate precedentemente, cioè: difficoltà tecniche (DT), costo (PC), tempo (PT), tipo di materiale fissile (MT), probabilità di rilevamento (DP) e efficienza nel rilevamento (DE).

La conclusione del gruppo di esperti del PR&PP è stata che, seguendo la metodologia, i risultati dei tre diversi approcci offrivano risultati coerenti tra loro, nei limiti posti dal diverso tipo di analisi e scelte degli analisti. Dei tre diversi approcci utilizzati per la valutazione, quello qualitativo è la base per successive analisi qualitative. Questo approccio, che si basa essenzialmente su valutazioni di esperti, è il più indicato quando non tutti i dettagli di un sistema sono noti, ad esempio nelle prime fasi di progetto, oppure quando è richiesta una valutazione rapida. I metodi basati su alberi logici e Markoviano (adattato dal *Brookhaven National Laboratory* per valutazioni PR&PP) permettono valutazioni più precise con ridotti margini di incertezza, ma richiedono un maggiore livello di dettaglio del progetto.

Un'altra conclusione del gruppo fu che erano necessari ulteriori test per capire più a fondo limiti e validità della metodologia e del suo utilizzo avendo in mente i tre principali destinatari: decisori politici, progettisti e altri utilizzatori.

⁹ PR&PP Working Group, “GIF Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical protection of Generation IV Nuclear Energy Systems: Overview and Perspectives” ESARDA Bulletin, No. 39, ottobre 2008

¹⁰ Quantità Significativa: quantitativo di materiale nucleare disponendo del quale, tenendo conto di processi conversione, non si può escludere la realizzazione di un ordigno nucleare esplosivo.

4.1.2 Caso Studio 2007-2008

Il passo successivo, a partire dal 2007, è stata una valutazione complessiva del caso studio ESFR, considerando questa volta anche il reattore veloce e un più ampio ventaglio di minacce e scenari. Lo scopo dello studio in questo caso era valutare l'utilità della metodologia nel fornire indicazioni ai progettisti, anche nelle fasi preliminari dei progetti. Un altro scopo era verificare la sensibilità della metodologia, cioè la capacità di poter rilevare variazioni, anche lievi, nel progetto.

Il quadro di riferimento di questo secondo caso studio ha incluso un ventaglio più vasto di minacce e strategie. Per la proliferazione nucleare, si è considerato uno stato con infrastrutture e mezzi adeguati, interessato a dotarsi di materiale nucleare utilizzabile in ordigni nucleari tramite: trafugamento di materiale nucleare, utilizzo illegale di impianti (sotto salvaguardia) per produzione illegale di materiale nucleare e infine l'uscita dal regime di non proliferazione e dichiarato trafugamento di materiale e uso illecito di impianti. Per la protezione fisica, la minaccia era costituita dal furto di materiale nucleare da parte di un gruppo di terroristi.

Il primo passo è stata la valutazione delle varie minacce sulla base di un reattore ESFR di riferimento: un bruciatore di attinidi, con un fattore di conversione di transuranici pari a 0.64 alimentato con uranio e plutonio recuperato dal combustibile esaurito proveniente da reattori ad acqua leggera (LWR) riprocessato e fabbricato sul sito. Successivamente sono state considerate variazioni del fattore di conversione rispetto al reattore di riferimento.

Dai risultati preliminari presentati nel corso del 2008^{11,12,13,14}, la metodologia dimostra una sostanziale capacità di fornire indicazioni utili ai progettisti e una sensibilità sufficiente a cogliere variazioni nel sistema. Rimangono tuttavia da approfondire alcune aree quali: come strutturare e rendere sistematica la valutazione qualitativa di esperti, l'analisi delle incertezze e sensibilità, la visualizzazione dei risultati, nonché la definizione delle misure di PR e PP e la possibilità di loro accorpamenti.

4.2 *Applicazione ai sistemi Gen IV*

Per l'utilizzo della metodologia in tutti i sistemi GenIV selezionati, una volta che questa si sia dimostrata affidabile e robusta, è fondamentale che i progettisti dei vari sistemi familiarizzino il prima possibile con la metodologia: solo in questo modo sarà possibile inserire già nelle primissime fasi di progetto quegli elementi che ne aumenteranno le caratteristiche di non proliferazione nel modo più efficiente e meno costoso.

La necessità di una collaborazione stretta tra il gruppo di esperti PR&PP e i progettisti dei sistemi GenIV fa parte della ridefinizione del mandato del gruppo, ora denominato *Working Group* (WG). Per facilitare questo processo, nel corso del 2008 si sono svolti due meeting

¹¹ Zentner, M.D., Coles, G.A., Therios, I.U., "Qualitative Assessment of Diversion Scenarios for an Example Sodium Fast Reactor Using the Gen IV PR&PP Methodology", 49th INMM Annual Meeting, USA, July 2008

¹² Cojazzi, G.G.M., Renda, G., Choi, J-S., "Applying the GIF PR&PP Methodology for a qualitative analysis of a misuse scenario in a notional GenIV Example Sodium Fast Reactor", 49th INMM Annual Meeting, USA, July 2008

¹³ Yue, M., Cheng, L., Bari, R.A., "Markov Model Application to Proliferation Risk Reduction of an Advanced Nuclear System", 49th INMM Annual Meeting, USA, July 2008

¹⁴ Yue, M., Cheng, L., Bari, R.A., "Markov Based Approach for Proliferation Risk Reduction of Nuclear Systems", Nuclear Technology, Vol:162, 88, pp. 26-44, 2008

cui hanno partecipato sia il WG PR&PP che i rappresentanti degli *Steering Committees* dei sistemi Gen IV.

In particolare, un incontro specifico è stato organizzato a maggio al Brookhaven National Laboratory per decidere come procedere in modo sinergico. Uno dei risultati è stata la creazione di team tra i membri del WG PR&PP e rappresentanti degli *steering committee* dei vari sistemi, il cui compito sarà la caratterizzazione di tutti e sei i sistemi in termini di non proliferazione e protezione fisica. Il risultato sarà documentato in *White Papers* che dovrebbero essere terminati entro il 2009. Nel corso del 2009 verrà anche selezionato uno o più sistemi da usare come nuovi casi studio.

Al momento è disponibile una sintesi preliminare di alcune delle caratteristiche di resistenza alla proliferazione e protezione fisica dei sistemi di riferimento GenIV¹⁵. Le caratteristiche di non proliferazione sono riferibili essenzialmente alle tipologie riportate in tabella, tipologie di tipo generale e non specifiche dei sistemi Gen IV. La tabella mostra anche gli elementi più significativi per ridurre i rischi di sabotaggio.

<i>Resistenza alla proliferazione</i>	<i>Protezione fisica</i>
Nocciolo non accessibile (lunga vita)	Perdita di refrigerante (e aumento di temperatura, senza fondere il nocciolo)
Ciclo aperto con combustibile ad alto burn-up	Rimozione di calore di decadimento con metodi passivi
Ciclo chiuso con combustibile ad alto burn-up (trattamento piro metallurgico)	Protezione contro attacchi esplosivi-missilistici
Ciclo chiuso con combustibile a basso burn-up (riprocessamento acquoso)	Sistemi di controllo automatici

La prima valutazione è che i sistemi GenIV presentano caratteristiche di protezione fisica simili o più elevate rispetto ad un Advanced LWR. In termini di proliferazione vi sono elementi innovativi che portano ad una maggiore resistenza, ad esempio: il LFR (*Lead-Cooled Fast Reactor*) in moduli di piccola taglia (10-100 MWe) ha il nocciolo non accessibile all'operatore; non è disponibile a livello industriale una tecnologia per riprocessare il combustibile ceramico di un VHTR (*Very-High-Temperature Reactor*); nel MSR (Molten Salt Reactor) gli attinidi vengono quasi completamente bruciati e non vi è riciclo.

Bisognerà tuttavia aspettare il lavoro congiunto del WG del GIF PR&PP con gli *steering committees* dei vari sistemi per avere una caratterizzazione più puntuale.

¹⁵ F. Sevini, G.G.M. Cojazzi, G. Renda "Proliferation Resistance and Physical Protection Robustness Characteristics of innovative and Advanced Nuclear Energy Systems", ESARDA Bulletin, No.39, ottobre 2008

5 “Salvaguardabilità”

Il fatto che non esistono soluzioni tecniche per impedire la proliferazione nucleare o che possano proteggere contro furti e sabotaggi, e che i sistemi di nuova generazione non pretendono di eliminare tale rischio, bensì di minimizzarlo, fa sì che l’approccio istituzionale, o misure estrinseche, abbia un ruolo fondamentale, in particolare le salvaguardie internazionali.

Il concetto di “salvaguardabilità” - cioè la facilità con cui le salvaguardie internazionali possono essere applicate, in maniera efficace e efficiente, ad un sistema – si colloca a cavallo tra misure intrinseche e estrinseche. Benché non sia una metodologia e non sia necessario per l’applicazione delle metodologie descritte fin’ora, può contribuire, parallelamente e sinergicamente alle metodologie sviluppate, a rafforzare il regime di non proliferazione.

La metodologia INPRO, benché non esplicitamente, ha indicatori che sottintendono il concetto di salvaguardabilità sotto l’*User Requirement 3*.

La metodologia GIF PR&PP ha dato spazio e importanza a questo concetto che è incluso nella Rev.5 della Metodologia (App. D)⁸. Il Joint Research Centre della Commissione Europea è tra i promotori dell’introduzione di questo concetto nella metodologia PR&PP ed è impegnato a svilupparlo maggiormente, con un approccio olistico sfruttando l’esperienza e conoscenza maturata nel campo delle salvaguardie e resistenza alla proliferazione¹⁶.

È importante notare che il legame tra resistenza alla proliferazione e salvaguardie è meno ovvio di quello che si potrebbe pensare. Infatti, resistenza alla proliferazione e salvaguardie non sempre vanno nella stessa direzione e può essere che programmi e misure studiate per aumentare la resistenza alla proliferazione del ciclo del combustibile, paradossalmente indeboliscano le verifiche di salvaguardia.

Ad esempio, in una iniziativa multilaterale come GNEP sono previsti impianti di fabbricazione, arricchimento e riprocessamento caratterizzati da grandi flussi di materiale che, se da un lato permettono un maggior controllo sulla diffusione delle tecnologie, dall’altro comportano serie difficoltà per i sistemi di contabilità della IAEA. Inoltre, essendo impianti industriali generalmente privati, può non essere facile imporre criteri di progetto che facilitino le salvaguardie, particolarmente se graveranno significativamente sui costi di operazione. Il problema del corretto bilancio di materiale diventa rilevante in scenari (come GNEP) in cui è ipotizzabile un forte movimento di grandi quantità di materiale tra un impianto e l’altro, probabilmente tra paesi diversi. Ad ogni passaggio è facile che gli errori di bilancio aumentino fino a diventare inaccettabili.

Un’altra difficoltà introdotta dai sistemi energetici innovativi è la presenza di attinidi minori che rendono il materiale più protetto in quanto poco decontaminato, ma sono ancora “sconosciuti” nel mondo delle salvaguardie in termini di tecnologia e strumentazione. Questa è un’area in cui la ricerca e sviluppo tecnologico è essenziale.

Per tenere conto degli elevati flussi in ingresso e uscita e del fatto che gli impianti saranno remotizzati per via dell’elevata attivazione del materiale in tutti gli stadi del ciclo, sembra

¹⁶ G.G.M. Cojazzi, G. Renda, F. Sevinci “*Proliferation Resistance Characteristics of Advanced Nuclear Energy Systems: a Safeguardability Point of View*”, ESARDA Bulletin, No.39, ottobre 2008


inevitabile che le salvaguardie si fonderanno sempre di più sul controllo in quasi-tempo reale dei processi. La conseguenza è che la IAEA si troverebbe nella posizione di dover gestire, analizzare e interpretare grandi quantità di dati: cosa per la quale al momento non è attrezzata e che richiederà risorse ingenti.

Per garantire un aumentato controllo su materiale e tecnologie e allo stesso tempo ridurre le risorse per le salvaguardie internazionali vi sono essenzialmente due modi.

Il primo è quello di rendere le verifiche di salvaguardia più efficienti e flessibili sia per colmare i gap attuali (ad esempio la difficoltà di scoprire impianti clandestini) sia per essere in grado di adattarsi ai nuovi scenari: la ricerca e sviluppo per tecniche avanzate di salvaguardia è essenziale.

<i>Dal Workshop JAEA-IAEA “Advanced Safeguards Technology for the Future Nuclear Fuel Cycle” nov. 2007</i>	
<p><u>Scoperta di attività non dichiarate:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Spettrometria laser mobile: LIDAR (<i>Light detection and ranging</i>) per scoprire attività e impianti non dichiarati. ○ Monitoraggio ambientale con campionamento e analisi di gas in atmosfera tramite strumentazione mobile: per scoprire attività e impianti non dichiarati. ○ Scoperta e analisi di emissioni di energia: per scoprire attività e impianti non dichiarati 	<p><u>Verifica:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Neutron imaging</i>: per individuare la presenza (o l’assenza) di sovrapproduzione di LEU in impianti di arricchimento con centrifughe. ○ <i>Tuneable diode laser spectroscopy</i> (TDLS) per monitorare il flusso di UF₆ Risonanza magnetica per monitorare in modo non intrusivo l’arricchimento e il flusso in un impianto di centrifughe a gas. ○ <i>Antineutrino detection</i>: per monitorare le condizioni operative del nocciolo di un reattore nucleare.
<p><u>Attività complementari e forensi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Spettrometria laser LIBS (<i>Laser-Induced Breakdown Spectroscopy</i>), per determinare natura e storia di composti e elementi tramite analisi sul sito, e LALIF (<i>Laser Ablation/Laser-Induced Fluorescence</i>) per una rapida analisi sul posto di possibili impianti di arricchimento o riprocessamento non dichiarati ○ <i>Solid state chemical sensors</i> per identificare composti chimici associati a processi del ciclo del combustibile. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Optically stimulated luminescence</i> (OSL) per uso forense per determinare se un sito sospetto è stato utilizzato per tenere o manipolare materiale nucleare. ○ <i>Ground penetrating radar</i> (GPR) per verificare spostamenti sotterranei dichiarati di materiale sotto salvaguardia e scoprire attività sotterranee non dichiarate.

Il secondo è di agire sulla salvaguardabilità dei futuri impianti, affrontando il progetto di un reattore e di tutte le altre fasi del ciclo del combustibile utilizzando l’approccio *safeguards by design* che è inerentemente più efficiente rispetto all’introduzione di misure di salvaguardia su impianti già esistenti. Continuando lo sviluppo del concetto di salvaguardabilità, si potrebbero fare passi avanti nella determinazione di linee guida che permettano ai progettisti di sistemi innovativi di tenerne conto fin dalle prime fasi di progetto. Le metodologie internazionali sviluppate dal GIF PR&PP WG e da INPRO sono gli strumenti per arrivare a questo scopo. Tuttavia, nel caso di INPRO le linee guida sono troppo ad alto livello e difficilmente si possono tradurre, per ora, in specifiche di progetto. La metodologia di valutazione del PR&PP è invece più focalizzata su questo aspetto. Inoltre, per poter applicare nella pratica questo concetto è necessaria un’interazione tra i progettisti e gli specialisti di non proliferazione prima che un impianto venga progettato, costruito e operato: azione che sta attualmente avvenendo tra il GIF PR&PP WG e gli *Steering Committees* dei sistemi GenIV.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	FPN – P9LU- 016	0	R	17	18

6 Attività ENEA


Da dicembre 2007 un esperto dell'ENEA è entrato a far parte del WG PR&PP, attraverso EURATOM, e da allora ha seguito le due linee di attività su cui è attualmente impegnato il gruppo PR&PP: la finalizzazione del caso studio su un ipotetico sistema GenIV, l'ESFR, per testare la metodologia e la futura applicazione della metodologia ai sistemi GenIV reali.

Come contributo alla metodologia sviluppata dal WG PR&PP per ora si è prevista la valutazione di una delle varianti di nocciolo del ESFR, nel Caso Studio del 2007-2008 (vedi paragrafo 4.1.2). La differenza più significativa di questa variante rispetto alla configurazione del nocciolo di riferimento è il fatto che in questo caso non si tratta di un 'bruciatore di attinidi', in quanto il bilancio netto in termini di produzione e bruciamento di attinidi. Il primo passo è stata la familiarizzazione con la metodologia da parte di due esperti ENEA – un esperto in neutronica e uno in proliferazione nucleare – sul reattore di riferimento. I risultati della valutazione della variante, definita Design Variation 2 (DV2), sono attesi per i primi mesi del 2009.

Per approfondire la conoscenza sulle caratteristiche e potenzialità della metodologia, un esperto ENEA ha inoltre partecipato ad un workshop su "*Markov Modeling of Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems*" tenutosi al *Brookhaven National Laboratory* con lo scopo di diffondere tra potenziali utilizzatori la conoscenza di elementi (codici e modellizzazione, sviluppo dati, e interpretazione) utili per l'applicazione di questo metodo in ambito di non proliferazione e protezione fisica.

L'ENEA fa parte del team PR&PP – *Steering Committe* che si occupa della redazione di un LFR. Questi team dovrebbero essere l'occasione per approfondire le relazioni tra i due attori e consentire ai progettisti di trarre vantaggio dal lavoro del WG. Gli incontri sono già iniziati ed è in fase di stesura una prima bozza delle caratteristiche tecniche e operative di un LFR potenzialmente rilevanti ai fini della resistenza alla proliferazione e protezione fisica. Questa prima parte dovrebbe essere completata agli inizi del 2009. Il secondo passo, che dovrebbe concludersi entro il 2009, consiste in una valutazione generale del sistema alla luce delle misure PR e PP. Una volta conclusi i *White Papers* per tutti i sistemi Gen IV, il WG PR&PP deciderà su quale o quali sistemi applicherà la metodologia.

L'ENEA è per ora presente in INPRO solo come osservatore, tuttavia riguardo la resistenza alla proliferazione e protezione fisica vi è ampia collaborazione con il WG PR&PP, per cui per l'ENEA è comunque possibile seguire gli sviluppi di entrambe le metodologie e delle loro applicazioni.

 Centro Ricerche Bologna	Sigla di identificazione FPN – P9LU- 016	Rev. 0	Distrib. R	Pag. 18	di 18
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

7 Conclusioni

Le due metodologie sviluppate a livello internazionale, INPRO e GIF PR&PP, sono in fase di consolidamento. Entrambe hanno pubblicato descrizioni dettagliate e manuali e la metodologia è stata applicata a casi test: un sistema DUPIC nel caso di INPRO e l'ipotetico ESFR nel caso GIF PR&PP.

In entrambi i casi è stata individuata la necessità di un affinamento di alcune parti della metodologia e, soprattutto, è emerso il fatto che occorre una maggiore casistica e più casi studio per poter capire meglio le potenzialità e i limiti delle metodologie.

Tuttavia, pur allo stato attuale, la loro applicazione è considerata utili a progettisti e utilizzatori, in particolare per meglio capire le caratteristiche dei sistemi innovativi in termini di resistenza alla proliferazione e protezione fisica.

Si noti che il processo di applicazione della metodologia è necessariamente evolutivo dato che i progetti sono ancora tutti in una fase iniziale e con molte opzioni ancora aperte, ad esempio sul tipo del combustibile; opzioni che si ripercuotono sul ciclo del combustibile associato e quindi sulle valutazioni di resistenza alla proliferazione. La valutazione dovrà tenere il passo con gli sviluppi dei sistemi; lo scopo è che ad ogni fase si traggano insegnamenti da introdurre a livello del sistema, misure di verifica/salvaguardie, sorveglianza e procedure.