

特集

INPRO（革新的原子炉および燃料サイクル
国際プロジェクト）の活動状況と今後の計画

尾本 彰，森脇 正直，杉本 純，中井 良大

別 刷

日本原子力学会誌

(*J. At. Energy Soc. Japan*)

Vol. 49, No. 2, pp. 89~111 (2007)

INPRO(革新的原子炉および燃料サイクル 国際プロジェクト)の活動状況と今後の計画

国際原子力機関(IAEA) 尾本 彰, 森脇 正直,
日本原子力研究開発機構 杉本 純, 中井 良大

INPROは、原子力エネルギーの利便が人類の持続的発展に貢献できることを確実なものにするために、期待される革新的原子炉および燃料サイクルの開発と導入に向けて考え協力する国際フォーラムで、IAEAが事務局となっている。最近の日本および米国の参加によりメンバー数は現在28を数え、原子力発電をまだ持たない5ヵ国をも含んだユーザーと技術保有国によるユニークなフォーラムとなっている。これまでのフェーズ1では、将来に向けて原子力システムが持つべき特性を明確にし、種々の原子力システムを評価する手法の開発が活動の中心であったが、2006年7月からフェーズ2に移行し、手法の改良、制度的な課題への取組み、技術開発のコーディネイトの3つの分野を追求する活動計画となっている。

I・INPROの目指すものは何か

1. 設立の背景

1987年のブルントラント報告¹⁾は、環境との調和と世代間のそして地域間の公平を図りつつ人類の持続的発展を、社会と経済と環境とを軸に考えつつ確保すべきことを提唱した。原子力エネルギーの利用は、この持続的発展に貢献できる魅力的な特性を多く備えている。実際、原子力エネルギーをエネルギーポートフォリオの中に適正に位置づけることによる持続的発展への貢献程度は、IAEAが他の国連関連機関との協調の下に策定したEISD(Energy Indicator for Sustainable Development)²⁾を用いて評価可能である³⁾。EISDは、個別の国におけるエネルギーシステムが持続的発展にどこまで繋がるのかを、資源の持続性、地球温暖化対策への貢献など環境との調和、エネルギー安全保障等、29の分野で測定する指標を提供している。原子力開発の分野でも、将来に向けた原子力エネルギーシステムのさまざまなオプションの持続的発展への寄与可能性を安全や核不拡散抵抗性などの分野で評価でき選択に寄与する指標がほしいところである。

また、原子力エネルギーの持続的発展への貢献をより確実なかつ有意なものにするためには、技術と制度の革

新が必要であろう。この革新を、技術の保有国も、これから原子力技術を持つとする国も、一緒になって考えてゆく必要がある。こうした指標作りや技術と制度の革新に向けた国際的なフォーラムがINPRO(International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles: 革新的原子炉および燃料サイクル国際プロジェクト)である。

INPROは、以上の背景のもと、IAEA総会決議(GC(44)/RES/21)により2000年に提案された(発足は翌2001年)。以後INPROは、IAEA総会決議や国連総会決議によって継続して支持されている。

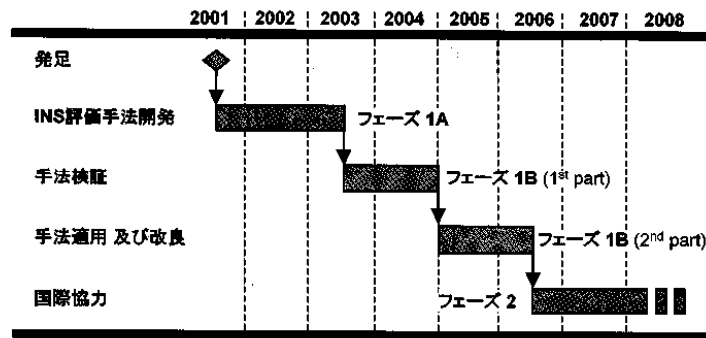
今後、開発途上国は人口増加、1人当たりのエネルギー消費の増加からエネルギー需要が今後大きく増えると予測されている⁴⁾。例えば、エネルギー需要増加の著しいインドと中国においては、その需要を満たすオプションの一つとして、2020~22年までにそれぞれ原子力発電容量を現在の8倍、6倍にそれぞれ増強する計画で、さらにその後も引き続き野心的な増強計画が検討されている^{4,5)}。それでも、これらの国におけるエネルギーセクターからの地球温暖化ガスの放出を安定化するには不足であると推定されている。原子力による持続的発展への貢献を確実なものにするには、国際的な協力による開発と導入が不可欠であり、それに対して大きく寄与することがINPROの目指すものである。

2. プロジェクトの目的、概要と全体計画

INPROでは、以下の2つの目的と5つのミッションが定義されている。

(目的)

Current Status and Future Direction of INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles): Akira OMOTO, Masanao MORIWAKI, Jun SUGIMOTO, Ryodai NAKAI.
(2006年11月23日受理)



第1図 INPRO スケジュール

- 21世紀のエネルギー需要に対し、原子力エネルギーが持続可能な形で貢献可能であることを確実にする手助けをすること
- 原子炉および燃料サイクルにおいて、望むべき革新を達成できるような国際レベルおよび国家レベルの行動を一緒に考えることができるように、技術ホルダー(技術を保持する国・機関)と技術ユーザー(技術を使用する国・機関)を結びつけること(ミッション)
- 先進国と発展途上国からの専門家や政策決定者が、21世紀における革新的原子力エネルギーシステム(INS: Innovative Nuclear Energy Systems)の開発と実用化に関する議論と、原子力エネルギー計画の技術面、経済性、環境問題、核不拡散および社会的側面の議論ができるように、フォーラムを提供すること
- INSを評価する手法を開発し、これを用いたINS評価に対して助言を行うこと
- 持続可能な形でエネルギー需要に対応可能なINSの役割と構造について、国際レベル、地域レベル、国家レベルで分析を行うこと
- INSの開発と実用化に関する国際的活動のコーディネーションを推進すること
- INSに興味を持つ発展途上国のニーズに特に目を向けること

第1図にINPROの全体スケジュールを示す。2001年の発足から2006年6月まで実施されたフェーズ1では、主にINS評価手法の開発を中心に活動が行われた。INS評価手法は、持続的な発展に貢献すべきINSに期待される要件を7分野(経済性、安全性、環境、廃棄物管理、核拡散抵抗性、セキュリティ⁹⁾、インフラ)にわたり基本原則/ユーザー要件/評価基準の3段階にわけて包括的に定めたもので、その利用マニュアルは個々のINSの評価ガイドラインとして利用可能である(II章で詳述)。そ

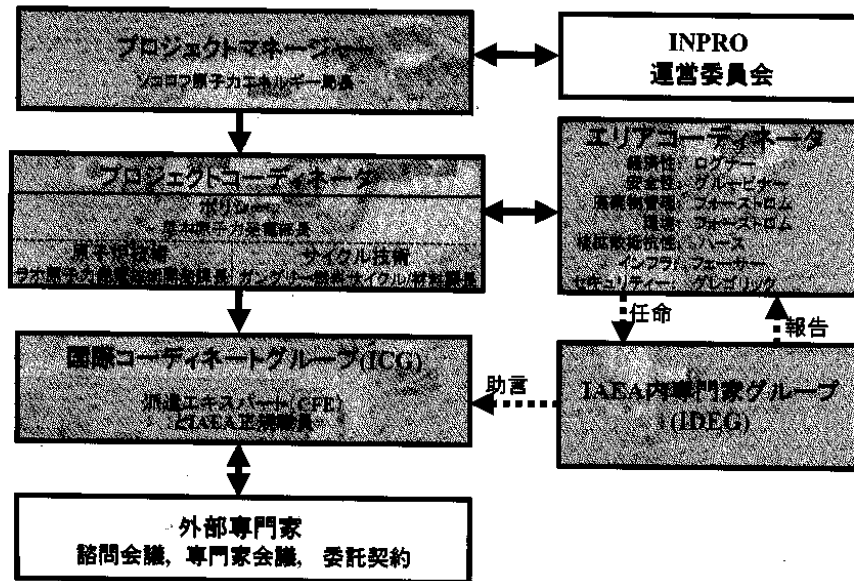
⁹⁾セキュリティ(核物質と原子力施設の防護)は2006年に新たに追加された分野。

こではまず、フェーズ1A¹⁰⁾において手法の基盤が作られ、2003年6月にIAEAの発行する技術図書TECDOC 1362⁹⁾にまとめられた。引き続き行われたフェーズ1B(1st Part)⁹⁾ではINPROメンバーによる検証のためのケーススタディ⁹⁾が行われ、それを反映した形で手法の体系が固まりTECDOC 1434¹⁰⁾として2004年末に発行された。フェーズ1B(2nd Part)¹¹⁾では、実際に手法を適用する手順と必要な関連情報をまとめたユーザーマニュアルが作成され、そのドラフトがINPROメンバーに対して配布された。並行して、INPROメンバーによって各国のINSの評価スタディがINPRO手法を適用して行われ、その大部分は現在も実施中である(評価スタディはIII章で詳述)。2006年7月から始まったフェーズ2¹²⁾では、手法の改良、制度的な課題への取組み、技術開発のコーディネイトの3つの分野の活動が進められている。後者2つは国際的な協力が一層重要な分野であるゆえ、フェーズ2を国際協力フェーズと呼んでいる。(フェーズ2計画はIV章で詳述)。

3. プロジェクト体制および参加国

INPROは加盟国によるフォーラムであり、その最高意思決定機関は、年に1、2回開催されメンバーの代表者で構成される運営委員会(Steering Committee)である。運営委員会の位置およびIAEA内部のプロジェクト体制(2006年11月現在)を第2図に示す。

IAEA内部でのINPROプロジェクトマネージャーはソコロフ原子力エネルギー局長で、その下に日々の活動の方針を定める3人のINPROプロジェクトコーディネーターがいる。ポリシーコーディネーターは尾本原子力発電部長、技術コーディネーターはラオ原子力発電技術開発課長(原子炉技術担当)とガンگریー燃料サイクル/材料課長(燃料サイクル技術担当)である。その下に国際コーディネイトグループ(ICG: International Coordinating Group)と称するグループが存在し、このメンバーが実質的な活動を行っている。ICGはINPROメンバー国からの派遣エキスパート(CFE: Cost Free Expert)と



第2図 INPRO 組織

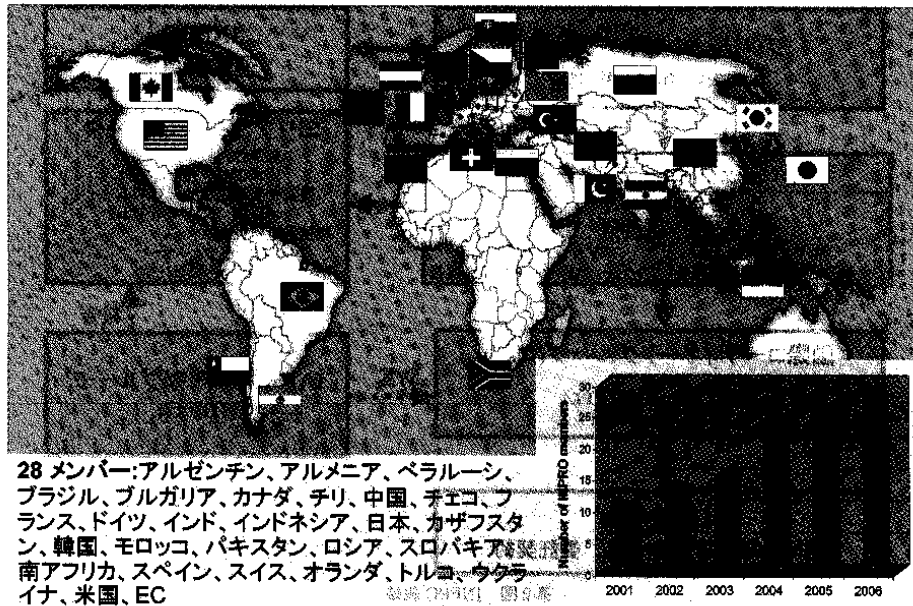
IAEA 正規職員からなり、IAEA 技術正規職員は森脇のみである。現時点で、ロシアが3名、スペインが1名、韓国が1名の CFE を、また、カナダ、米国、フランスが他業務兼任の形で CFE を各1名 ICG に派遣している。今までの CFE は総数30名に及ぶ。ICG は INPRO 内の各タスクを分担するが、INPRO は原子力発電部に事務局を置いているものの、安全や保障措置など IAEA 内部の他の部門の専門家の参加なしでは成り立たない。そこで、それぞれの分野での専門知識を有する IAEA 職員が IAEA 内専門家グループ (IDEG: Inter-Departmental Expert Group) を形成し ICG をサポートする。また、先にあげた7分野それぞれに IAEA 関連部署の幹部職員がエリアコーディネータとして担当しており、INPRO の活動全体へのアドバイスを与えると共に、IDEG の任命や各分野内の調整を行っている。

2006年11月現在、INPRO メンバーは次の27カ国と EC となっている：アルゼンチン、アルメニア、ベラルーシ、ブラジル、ブルガリア、カナダ、チリ、中国、チェコ、フランス、ドイツ、インド、インドネシア、日本、カザフスタン、韓国、モロッコ、パキスタン、ロシア、スロバキア、南アフリカ、スペイン、スイス、オランダ、トルコ、ウクライナ、米国。参加国の地理的な分布とメンバー数の推移を第3図に示すが、参加国は世界中にわたり、メンバー数は年々着実に増加している。GIF (Generation IV International Forum: 第4世代国際フォーラム) の構成メンバーが第4世代炉とサイクル技術開発を担う国を中心としているのに対し、INPRO では多くの技術ユーザー国がメンバーとなっており、そ

には原子力発電をいまだ国内に有していないトルコやチリやモロッコ等の国が参加しているのも特徴である。日本および米国は長くオブザーバーとして INPRO に参加していたが、米国は2005年12月に、日本は2006年4月に正式なメンバーとなった(日本と INPRO との関係については第V章で詳述)。プロジェクト運用資金は、正規職員の人件費を除き、INPRO メンバーから拠出される特別拠出金に依存しているが、今後の INS 評価手法改善および制度の検討の2活動領域はその性格上通常予算に次第に置き換えてゆき、運営資金を安定化することも検討中である。

4. IAEA 内の他の活動との関係

すでに述べたように、INPRO は7つの分野を含み、それぞれの分野を専門に担当する IAEA 内部の各部署の協力が活動を進める上で不可欠である。具体的には、「経済性」では、原子力エネルギー局内の計画・経済スタディ課、「安全性」では原子力安全・セキュリティ局、「環境」および「廃棄物管理」では原子力エネルギー局内の廃棄物技術課と原子力科学・応用局、原子力安全・セキュリティ局、「核拡散抵抗性」では保障措置局、「セキュリティ」では原子力安全・セキュリティ局内の原子力セキュリティ室、「インフラ」では原子力エネルギー局内の原子力エンジニアリング課である。また、原子力エネルギー局内の各炉型技術(軽水炉、重水炉、高速炉、高温ガス炉、中小型炉等)および各燃料サイクル技術の専門スタッフの協力は不可欠である。INPRO の活動は、各個別分野/各個別技術での IAEA の活動を代替するもの



第3図 INPROメンバー

ではなく、将来の原子炉およびサイクルの技術と制度に関する革新を分野をまたいで包括的に検討するものである。

5. GIF との関係

革新炉とサイクルに関する国際プロジェクト GIF は、技術開発のためのフォーラムで、現在は6炉型を選定し実用化研究を行っている。INPRO は、これから原子力発電を計画しているユーザー国をも含み、技術と制度の革新を考える国際フォーラムで、構成メンバー、活動領域(評価手法、制度、技術開発の3分野)、活動の視点(ユーザーからの INS への期待を重視)において、GIF との違いがある。すでに GIF 発足当時より、IAEA はその専門家を安全や核不拡散におけるワーキンググループに参加させて、その活動に協力してきた。GIF、INPRO の代表はそれぞれ、相手の意思決定機関(GIF 政策グループ、INPRO 運営委員会)にオブザーバーとして参加してきている。GIF と IAEA および INPRO の協力関係を議論するための会合(2005年9月)を経て、活動の相補性を確認するとともに、各分野での具体的協力項目が合意され、実行に移されてきている。例えば、経済性に関するユーザーの立場に立った INPRO の評価手法は、GIF における技術提供者側の立場に立った経済性評価手法と相互に補完関係にあり、相互の手法が相手に提供されている。この相補性認識は、2006年7月の G8 サミットにおけるエネルギーセキュリティに関する共同声明¹⁹⁾においても確認されているところである。(尾本 彰)

II. これまでの活動成果—革新的システムの評価手法の開発

1. 評価手法の目的

すでに述べたように、INPRO の第1の目的は、「21世紀のエネルギー需要に対し、原子力エネルギーが持続可能な形で貢献可能であることを確実にする手助けをすること」であり、そのためには、現在開発中あるいは今後開発される原子力システムが、持続的発展に貢献する上で求められる期待を明確にし、これをできるだけ定量的な指標で評価する基準が必要となる。INPRO 評価手法の開発目的は、国際的な合意の下でこの基準を作ることにあった。

エネルギー分野における持続的発展の観点からの評価手法(ものさしを含む)には、次の3つが必要と考えられる。

- (1) 各国のエネルギーポートフォリオを持続的発展の観点から、経済、社会、環境の3つの局面で評価する EISD²⁰⁾
- (2) エネルギー供給オプションを比較評価する手法(Comparative Assessment)¹⁴⁾¹⁹⁾
- (3) 原子力オプションに限定して、持続的発展の観点から、期待の充足度をオプション間で比較あるいは単独で評価する手法

このうち、INPRO は第3に相当する手法を提供していることになる²⁾。INPRO では、原子力システムによる持続的発展への貢献を確実なものにするために、7つの

分野(経済性、安全性、セキュリティ、環境、廃棄物管理、核拡散抵抗性、インフラ)における期待を満足することを要求している。

以上を踏まえ、INPRO 手法適用による INS 評価の目的として、以下の3つを定めている。

- INS が持続的発展に貢献すると判断するための必要要件(しきい値)を満たしているか否かを判断する(INS スクリーン)
- 複数の INS 候補がある場合、持続的発展への貢献の観点から、どれが優れているか判断する(INS 比較)
- INS が持続可能性の基準に達していなかった場合に、それを改善するための R&D 方針を規定する(R&D 策定)

この評価方法を用いることにより、メンバー国は自国で開発を進めている原子力システムや他国から導入しようとしているシステムおよび国/地域の原子力開発シナリオを、持続的発展の観点から客観的に評価することが可能となる。(尾本 彰, 森脇正直)

2. INS(革新的原子力エネルギーシステム)の定義

INPRO 手法の評価対象となる INS は、通常よく使われる「革新炉」より広い意味を持っている。まず、INS は原子炉等個別のシステムを指すものではなく、関連する原子力システムの総体を指す。すなわち、INS はフロントエンド(ウラン採掘、精製・転換、濃縮、燃料製造)、発電、バックエンド(使用済燃料保管、再処理、最終処分)、燃料輸送のすべてのシステム/プロセスを含む。個々のシステム(例えば、原子炉)は INS 内のコンポーネント(Component)と呼び、総体としての INS と区別している。

また、INS は、革新的な(Innovative)システムとともに、改良的な(Evolutionary)システムも含む。現在建設が検討されている原子炉システムはすべてこの改良的な炉の範疇であり INS に含まれる。もちろん、いわゆる革新炉も INS に含まれる。

さらに、INS は、設計、建設、運転・保守、デコミッションのすべてフェーズを含むとしている。また、INS は、システムのみならず、付随するインフラも含むとしている(インフラについては II-5 節で詳述)。

最後に、INPRO では、現在から50年後までの INS を視野に入れている。

このように、INS の定義は幅広く、これに対して上述の7段階の検討を行うことにより、原子力システム全体の持続的発展への貢献を包括的に遺漏なく評価することを目指している。この Holistic approach(包括的アプローチ)は INPRO 手法の大きな特徴である。

3. 評価スコープと前提条件

INS の評価における評価者は以下のステップを踏

日本原子力学会誌, Vol.49, No.5 (2007)

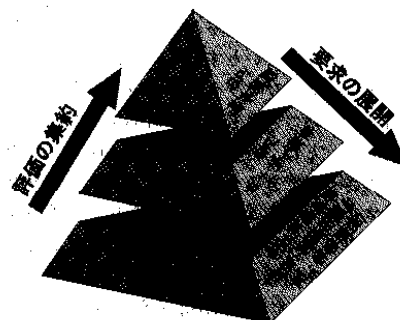
むことを求められている。

- (1) 国ベース、地域ベース、国際ベースの原子力将来シナリオの構築
- (2) シナリオ内で用いられる INS の定義(INS を構成する各コンポーネントの同定)
- (3) 定義された INS に対し INPRO 手法を用いて各分野で評価
- (4) 持続可能性の総合評価と R&D ニーズの特定

ここで、(1)と(2)は、狭義には INS 評価のスコープ外で、INS 評価の前提条件となるものである。(3)が INS 評価の中心であり、II-4, 5 節においてその詳細を述べる。

4. 評価手法の特徴

INPRO 評価手法は、上から Basic Principle(BP:基本原則)、User Requirement(UR:ユーザー要件)、Criterion(CR:評価基準)の3つの階層から成り立つ。BP は持続可能性を満たすべき INS の基本原則を概念的に述べたものであり、その下の階層である UR は BP から展開され、何をすべきかという具体的なアクションを規定したものである。CR は、さらに UR から展開され、実際評価する際に使用される Indicator(IN:評価指標)と Acceptance Limit(AL:許容限度)から成り立っている。CR は、①実数型、②整数型、③論理型(Yes or No)の3種類が存在する。実際の評価は CR のレベルで行われ、各 IN が AL を満足するかどうかで判断される。さらに、ある UR を構成するすべての CR が満足されればその UR が満足されるとし、ある BP を構成するすべての UR が満足されればその BP が満足されるとしている。INS が持続可能性をもつためには、すべての BP が満足される必要があり、これはとりもなおさずすべての CR が満足されることを意味する。第4図に以上の関係を図示するが、上から下の方に持続可能性に対する要求が展開され、逆に下から上に評価結果が集約される構成となっているのが、INPRO 評価手法の大きな特徴である。



第4図 INPRO 手法の構成

第1表 INPRO 評価手法(経済性)

基本原則 (BP: Basic Principles)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (OR: Criteria)	
		評価指標 (IN: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limit)
BP1 INSからのエネルギー、関連生成物及びサービスは供給可能で利用可能であること *INS: 革新的原子力システム (Innovative Nuclear Energy System) 原子炉及び燃料サイクル含む	UR1.1 すべての関連コストや負債を考慮したINSからのエネルギーコストC _N は、競合エネルギーソースのコストC _A と比べ、競争力をもつものでなければならない。競合エネルギーソースとは、同時期、同地域で同じ利便性を提供できるもの。	1.1.1 原子力エネルギーコスト: C _N 1.1.2 競合ソースからのエネルギーコスト: C _A	1.1.1と1.1.2 C _N < k · C _A
	UR1.2 INSの設計、建設、試運転に必要な建設中利子を含む投資額は、必要な投資ファンドが起る程度であること	1.2.1 財務上のメリット 1.2.2 全投資額	1.2.1 簡便性の競合エネルギーと比べメリットが同程度か優れている 1.2.2 全投資額が、対応する市場環境の中で投資を喚起する程度である
	UR1.3 INSに対する投資リスクは他エネルギープロジェクトのリスクを考慮して投資家にとって受け入れ可能であること	1.3.1 許認可状況 1.3.2 建設及び試運転にかかる時間 1.3.3 原子力エネルギーに対して長期的支持を示す政治環境に関する指標	1.3.1 事前許認可が可能であること 1.3.2 スケジュールが現実的であること他のエネルギーに比べ同程度であること 1.3.3 Yes
	UR1.4 INSは異なる市場の要求に合致すること	1.4.1 INSの柔軟性	1.4.1 異なる仮想的な環境においても適合できる設計柔軟性を要請できる性能を持つこと

5. 評価手法の概要

本節では、現在検討が進められている「セキュリティ」を除く6つの分野それぞれに対し、INPRO 評価手法の概要をまとめる。

(1) 経済性⁶⁾

第1表に経済性のINPRO 評価手法を示す。経済性の唯一のBPは、以下である。

BP1: 「INSからのエネルギー、関連生成物およびサービスは供給可能かつ利用可能であること」
ここで、供給可能(available)とは技術的な可能性を指し、利用可能(affordable)とは価格面においてユーザーの選択肢となりえることを意味している。すなわち、INSは技術的に成立し実際に開発され建設されるものであるとともに、他エネルギー源との価格競争に打ち勝って生き残るものでなければならないとしているのが、このBPである。

このBPはさらに、コスト競争力(UR 1.1)、投資(UR 1.2)、投資リスク(UR 1.3)、柔軟性(UR 1.4)の4つのURに細分化されている。それぞれの詳しい記述は第1表を参照していただきたい。例として、第1のURであるコスト競争力(UR 1.1)のINは次の2つである。

IN 1.1.1: 原子力エネルギーコスト: C_N

IN 1.1.2: 競合ソースからのエネルギーコスト: C_A
そして、これに対応するALは以下の通りである。

AL 1.1.1/1.1.2: C_N < k · C_A

すなわち、原子力エネルギーコストは、その国、あるいは、その地域で競合するエネルギーソースのコストより小さくしなければならないとするものである。コストは、フロントエンドおよびバックエンドコストも含むものとし、競合ソースのコストもそれに対応するものを含むものとしている。kは、評価面特有の事由により1.0より大きくも小さくもできるとしている。これらの事由としては、エネルギーセキュリティと温室効果ガス排出等への考慮があげられるが、規制外のkを与える場合は、その算出の根拠を明確にすることが求められており、長期的にはkを1.0にする努力が求められる。

(2) 安全性⁷⁾

第2表に安全性のINPRO 評価手法を示す。INPROにおける安全性評価手法は、これまでに現行の原子炉および燃料サイクル施設に関して様々な安全要求基準が確立されていること(例えば、米国EPRIによるAdvanced Light Water Reactor Utility Requirements, 欧州の電力によるEuropean Utility Requirements, IAEAのSafety Standards Series等)を十分視野に入れて確立されたものである。安全性のBPおよびURは、現在の安全要求の方向性を考慮するとともに、発展途上の潜在的な要求をも包含するように作られている。原子炉に対する基本的な安全機能は、反応度制御、炉心からの熱除去、放射性物質の閉じ込めおよび放射線の遮蔽である。燃料サイクル施設に対する基本的な安全機能は、未臨界および化学制御、放射性核種からの熱除去、放射性物質の閉じ込めおよび放射線の遮蔽である。INSがこれらの基本的な安全機能を持つことを確実にするために、以下に示す4つのBPが作られ、それぞれのBPはさらに複数のURに展開されている。

BP1: INSには基本的な安全方針の一部として、強化された単一化された深層防護(Defence in depth)が組み込まれており、深層防護の各レベルは現行設備のそれ以上に独立していること

BP2: INSの設計には適切であれば基本的な安全方針の一部として固有安全特性と受動的安全システムを組み込み、INSを安全性と信頼性に優れたものとする

BP3: 建設/試運転、運転、廃炉中のINSからの、作業員および公衆の被曝と環境影響のリスクが、同様の目的で使用される産業施設からのリスクと同等以下であることを保証すること

BP4: INS開発は、プラント特性の知見や設計・安全評価に用いられる解析手法の信頼性を、少なくとも現行プラントの信頼レベルまで引き上げるために関連する研究・開発・実証を含むものとする

INPROでは、安全性をより高めるために、INSはより相互間の独立性の高い深層防護を持つこと、また、固

第2表 INPRO 評価手法(安全性)

基本原則 (BP: Basic Principles)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (CR: Criteria)	
		評価指標 (IN: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limit)
BP1 INS設備には基本的な安全方針の一部として、強化された深層防御(Defence-in-depth)が組み込まれており、深層防御の各レベルは運行設備以上に独立していること	UR1.1 INS施設は、運転時及びシステムや構成要素の故障時にも運行設計に比べて強固であること	1.1.1 設計の強固性(脆弱性、余裕) 1.1.2 運転の高い性能 1.1.3 検査性能 1.1.4 故障や外乱の想定頻度 1.1.5 人的関与が必要となるまでのグレース期間 1.1.6 過渡事象に対応できる慣性	1.1.1から1.1.6 本文で議論されている少なくともいくつかの観点で運行設計より優れている
	UR1.2 INS施設は、予想される運転上の事象が免れ事故状態に至らないよう、通常運転状態からの逸脱を検知し阻止すること	1.2.1 そのような逸脱を検出し阻止または補償するための計装制御システムや固有システムの性能	1.2.1 安全に関連する主要システム変数(流量、圧力、温度、照射レベルなど)が継続的な運転によって許容限度をこえない(報告が必要とならないこと)
	UR1.3 事故の発生確率は安全目標全体と適合するように低減されること。もし事故が起こってもエンジニアリング上の安全策がINSを制御可能な状態へと復帰させ、引き継ぎ停止させることができ、放射能物質の閉じ込めを保障できること。人間の関与と、その依存度を最小限にし、グレース期間以後は必要とする	1.3.1 設計基準事故の計算上の発生確率 1.3.2 人的関与が必要となるまでのグレース期間 1.3.3 エンジニアリング上の安全策の信頼性 1.3.4 防御(VRI)の数 1.3.5 (操作員の関与なしで)INSを制御可能な状態に回復させるエンジニアリング上の安全策の性能 1.3.6 非境界余裕	1.3.1 運行施設に比べて、プラントにダメージを与える原因となる事故の頻度が低い 1.3.2 運行施設に比べて増加 1.3.3 運行施設に比べて優れているか同等 1.3.4 少なくとも一つ 1.3.5 制御可能な状態へ遷移するのに十分な性能 1.3.6 不確実性をカバーし、適当なグレース期間を持つのに十分な余裕
	UR1.4 内部事象によるINS格納容器内への放射性物質の大量放出の頻度が低減されること。もし放出が起きたら、その影響は緩和されること	4.1 格納容器内への放射性物質の大量放出の計算上の発生確率 4.2 格納容器内の調温システムパラメータと動作レベルを制御するのに十分な自然及びエンジニアリングプロセス 4.3 プラント内のシビアアクシデント管理	4.1 少なくとも運行設計より1桁低減。都合に設置する場合はそれより低減 4.2 そのようなプロセスが存在すること 4.3 格納容器外への大量放出を防止するための操作規程、機器、トレーニング
	UR1.5 閉鎖の産業施設で行われる緊急措置以上の措置であるプラントサイト近傍地区の強制移動や避難措置が必要ないよう、INS施設からの放射性物質の大量放出は事実上防げられること	1.5.1 外部環境への放射性物質大量放出の計算上の発生確率 1.5.2 放出の計算上の影響(照射量など) 1.5.3 個人及び集団の計算上のリスク	1.5.1 1年あたり10 ⁻⁶ 以下の確率、あるいは、設計によって事実上除外されること 1.5.2 避難措置が必要でない程度に十分に低い影響。適切なサイト外での影響緩和措置(例えば一時的な食料制限)がとられること 1.5.3 同様な目的で使用される施設と同程度
	UR1.6 深層防御の異なるレベルがあり運行設計以上に互いに独立していることを実証できるように、INS施設に対して評価が行われること	1.6.1 深層防御の各レベルの独立性	1.6.1 決定的かつ確率的な手法、危険分析などを通して適切な独立性が実証されること
	UR1.7 INS設備の安全な運転は、設計、建設、運転、廃炉に必要とされる人的要因の系統だった適用により改良されたマンマシンインターフェイスによってサポートされること	1.7.1 プラントライフサイクルを通して人的要因が系統的に考慮されていること 1.7.2 他の産業や原子力特有のモデル開発からの正式なHuman Response Modelの適用	1.7.1 評価による満足できる結果 1.7.2 人的要因モデルで予想される人的エラーの頻度が既存プラントに比べて低減 -初期診断や実施時間操作員補助のための人工知能の使用 -既存プラントに比べて通常運転や短期事故管理のための操作員への依存度の低減
BP2 INSの設計には適切であれば基本的な安全方針の一部として、強化された深層防御(Defence-in-depth)が組み込まれており、INSを安全性と信頼性に優れたものとする	UR2.1 INSは適切であれば固有安全特性と自動システムを組み込むことにより既存プラントに比べて危険を除外あるいは最小化するよう努めること	2.1.1 指標例: 蓄積エネルギー、可塑性、脆性、放射能物質質量、可能な過剰反応度、反応度フィードバック 2.1.2 非常運転や事故の期待頻度 2.1.3 非常運転や事故の影響度 2.1.4 革新的要素やアプローチの信頼度	2.1.1 運行設計に押し替わっている 2.1.2 既存施設に比べ高い頻度 2.1.3 既存施設に比べ低い影響度 2.1.4 妥当性が確立される
BP3 建設/試運転、運転、廃炉中のINSから、作業員及び公衆の被曝と環境影響のリスクが、同様の目的で使用される産業施設からのリスクと同等であることを保証すること	UR3.1 INS設備は、自動化、リモート保守、運行設計からの運転経験の利用を通して、被曝保護の最適化の概念が効果的に導入されるように保証すること UR3.2 通常運転中の個々のINSからの公衆の個人への被曝量は、最適化の概念の効果的な導入を反映すべきで、柔軟性の増加により既存施設のレベル以下に低減される可能性をもつこと	3.1.1 職業人の被曝量 3.2.1 一般公衆の被曝量	3.1.1 国内法や国際基準によって定義される限度以下であり、それにより作業員への健康被害が同様の目的で使用される産業におけるそれと同等であること 3.2.1 国内法や国際基準によって定義される限度以下であり、それにより一般公衆への健康被害が同様の目的で使用される産業におけるそれと同等であること
BP4 INS設備は、プラント特性の知見や設計・安全評価に用いられる解析手法の信頼性を、少なくとも既存プラントの信頼レベルまで引き上げるために、関連する研究・開発・実証を含むものとする	UR4.1 INSの安全基盤は商業化に先立って確信を持って確立されていること	4.1.1 定義された安全概念 4.1.2 特定された設計関連安全要求 4.1.3 安全性問題に対する明確なプロセス	すべてに対しYes
	UR4.2 システムと要素技術の信頼性に関する研究・開発・実証は、受動的システムや固有安全特性も含めて、安全評価をサポートするために必要と関連するすべての物理的、エンジニアリング的現象の完全なる把握が達成されるよう行われること	4.2.1 定義され実施されたRO&Dと構築されたデータベース 4.2.2 開発され検証された計算コードあるいは解析手法 4.2.3 スケール効果に対する理解と(あるいは)フルスケール試験の実施	すべてに対しYes
	UR4.3 既存の運転経験から大きく外れる原子炉や燃料サイクルに関しては、縮小したパイロットプラントや大規模な実証試験設備が建設されること	4.3.1 プロセスの新規性の度合い 4.3.2 パイロット施設の適合性のレベル	4.3.1a 新規性が高い場合: 設備が特定、建設、運転され、Lessons and Learnedが文章化されること 4.3.1b 新規性が低い場合: パイロットプラントを省略できる合理的理由 4.3.2 外挿するに十分な結果
	UR4.4 安全解析では、完全でかつ十分な安全解析が成されることを保証できるように、実行可能であれば、決定的手法と確率的手法の双方の手法を使用すること。技術が成熟するにたがって、Best Estimate(不連続性)のアプローチが、実際の危険性、特にシビアアクシデントを特定するために有用である	4.4.1 リスク情報手法のアプローチの使用 4.4.2 特定され適切に扱われる不確実性と態度	すべてに対しYes

有安全性と受動的安全システムを組み入れること、を安全方針とすることを期待している。さらに、緊急時の対策レベルをリスクの観点から、合理的なものとするためのペースを定めている。また、既存のシステムと大きく

異なる INS に対しては、実際の建設前に、大規模試験や実験炉・原型炉の建設等によって十分な検証を行い、INS に対する基盤技術レベルを向上させることを要求している。また、安全評価は燃料サイクル全体を考慮して

第3表 INPRO 評価手法(環境)

基本原則 (BP: Basic Principles)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (CR: Criteria)	
		評価指標 (IN: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limit)
BP1(予想される環境への影響の許容度) INSによってもたらされると(Best Estimate)によって予想される環境への悪影響は、同様のエネルギー生成物を生産する現行の原子力システムに十分包絡されるものであること	UR1.1 ライフサイクル全体を通じたINSの各要素からの環境へのストレス要因は現行基準に合致するかそれより優れたレベルまで削減可能であること UR1.2 INSに起因すると予想される環境への悪影響は、社会的・経済的要素を考慮に入れた場合、合理性をもった現実的な範囲でできるだけ低く抑えること(ALARP)	1.1.1 $L_{tot,i}$ ストレス要因 <i>i</i> のレベル 1.2.1 INSが環境への影響を限定するためにALARPの適用を反映できるか?	1.1.1 $L_{tot,i} \leq S_i$ S_i はストレス要因 <i>i</i> の基準 1.2.1 Yes
BP2(目的への適合性) INSは非再生可能資源を効率的に用いて21世紀のエネルギー要求に貢献できること	UR2.1(有効資源量との整合性) INSは、核分裂性物質と親物質及び他の非再生可能資源を枯渇させることなく、INS以外で使用されると予想されるこれらの資源も考慮に入れながら、21世紀中の世界中のエネルギー要求に貢献できること。さらに、INSは非再生可能資源を効率的に使用すること。 UR2.2(適切な正味エネルギー出力) INSのエネルギー出力は、INSの設置及び運転に要する想定できる程度の短期間に使われるエネルギー以上であること	2.1.1 $F_i(t)$: 時間 <i>t</i> でINSで利用可能な核分裂性物質/親物質の量 2.1.2 $G_i(t)$: 時間 <i>t</i> でINSで利用可能な物質 <i>i</i> の量 2.1.3 $P_i(t)$: 時間 <i>t</i> でINSで利用可能な(内部及び外部)出力 2.1.4 U_i : 採掘されたウラン <i>Mg</i> あたりINSIによってもたらされる(正味)最終利用エネルギー 2.1.5 T_i : 採掘されたトリウム <i>Mg</i> あたりINSIによってもたらされる(正味)最終利用エネルギー 2.1.6 C_i : 採られた非再生可能資源が <i>Mg</i> 使用されたうち、もたらされる(正味)最終利用エネルギー 2.2.1 T_{eq} : 全エネルギー入力とエネルギー出力が一致するために要する時間(年)	2.1.1 $F_i(t) > 0, \forall t < 100$ 年 2.1.2 $G_i(t) > 0, \forall t < 100$ 年 2.1.3 $P_i(t) \geq P_{req}(t), \forall t < 100$ 年ここで $P_{req}(t)$ は時間 <i>t</i> にINSによって得られる出力 2.1.4 $U_i > 10; U_i$: ウラン-100-PWRで達成可能な最大量 2.1.5 $T_i > T_0, T_0$: 現在運転中のトリウムサイクルで達成可能な <i>T</i> の最大量 2.1.6 $C_i > C_0, C_0$ は個々のケースに応じて設定する 2.2.1 $T_{eq} \leq k \cdot T_L, T_L$: INSの計画寿命, $k < 1$

包括的に評価するものとし、決定論的手法と確率論的な手法を組み合わせた方法をとることを求めている。

安全性のCRの例として以下を挙げる。

IN 1.5.1 : 外部環境への放射性物質大量放出の発生確率

AL 1.5.1 : 1年あたり 10^{-6} 以下の確率、あるいは設計によって事実上除外されること

(3) 環境¹⁰⁾

第3表に環境のINPRO評価手法を示す。環境保護は持続的発展が環境との調和を目指すものであるという観点から、中心的なテーマであり、環境評価は多くの国で産業施設を許認可する際の重要なプロセスとなっている。原子力エネルギーは、温暖化ガスをほとんど排出しないクリーンで環境に優しいエネルギー源であるが、INPRO手法では以下の2つのBPでINSが環境の観点でも持続可能性を持つことを確認するよう求めている。

BP1 : INSによってもたらされると(Best Estimate)によって予想される環境への悪影響は、同様のエネルギー生成物を生産する現行の原子力システムに十分包絡されるものであること

BP2 : INSは非再生可能資源を効率的に用いて21世紀のエネルギー要求に貢献できること

INPROでは、INSと環境との間の相互作用には2つの側面があると捉えており、1つはINSが環境に与える影響で、もう1つはINSが環境から得る資源である。それぞれ、BP1およびBP2に対応している。BP1では、環境に対する悪影響を現行レベル以下にすることを要求するものであり、この環境の定義には、人、動物、植物、土壌、水、空気、天然資源、地形、およびこれらの間の相互作用が含まれる。BP1の実評価レベルでは以下のCRが定義されている。

IN 1.1.1 $L_{tot,i}$: ストレス要因*i*のレベル

AL 1.1.1 $L_{tot,i} \leq S_i, S_i$ はストレス要因*i*の基準

ここで、環境に影響を与えるストレス要因として、放射性核種の放出、非放射性的な化学物質の放出、熱の放出、力学的エネルギーの放出が含まれる。INPRO手法では、放射線の人間への影響のみならず、これら様々なストレス要因が人間を含む様々な環境構成要素へ悪影響を与えないことを確認するよう求めている。しかし、実際には、影響度そのものを評価することは困難な場合が多い。すなわち、同じストレスレベルでも環境への影響は、施設が置かれている地理的条件や立地条件に依存してかなり異なるものとなるためである。そのため、INPROでは以下の考え方に立脚して、上記CRにあるように、影響度ではなくストレス要因レベルで評価を行うことを求めている。すなわち、すべての条件が同じと仮定すれば、ストレス要因のレベルが低ければ、その影響度も小さくなると考えられること、さらに、ストレス要因のレベルは、それが環境に届くまでの経路やストレスを受ける者(物)と比較して、設計者がコントロールしやすいこと、である。

BP2は、資源利用可能性を扱っている。すなわち、システムが持続可能性を持つためには、必要とされる資源は十分長い期間枯渇しないものでなければならない。これらの資源としては、核分裂性物質/親物質および他の重要な非再生可能資源が含まれる。INPRO手法では、INSで使われるこれらの資源が今後100年間枯渇しないものであることを確認するよう要求している。

(4) 廃棄物管理¹¹⁾

第4表に廃棄物管理のINPRO評価手法を示す。放射性廃棄物の問題は、上記「安全性」や「環境」と重複する部分があるが、問題が非常に長期にわたること、およびソーサームやそれが環境に届く経路が通常のINS施設とは異なることから、独立した分野として取り扱っている。IAEAでは、「Principles of Radioactive Waste

第4表 INPRO 評価手法(廃棄物管理)

基本原則 (BP: Basic Principles)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (CR: Criteria)	
		評価指標 (IN: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limit)
BP1(廃棄物の最小化) INSの放射性廃棄物の発生量は実行可能な範囲で最小とすること	UR1.1(発生時の廃棄物削減) INSは、処分場の環境において可動性を持つ長寿命で毒性が高い物質を含む廃棄物に重点を置いて、すべての段階で廃棄物の発生を最小化するように設計されること	α線源と他の長寿命放射線源のGWあたりの量 GWあたりの総Activity GWあたりの質量 GWあたりの体積 GWあたりの放射性廃棄物の一部となる化学的に毒性が高い物質	ALARP(合理性をもった現実的な範囲で低く) ALARP ALARP ALARP ALARP ALARP
BP2(人的健康と環境の保護) INSの放射性廃棄物は、時間と場所にかかわらず、人の健康と環境に対する許容保護レベルを保証するように管理されなければならない	UR2.1(人の健康の保護) INS廃棄物管理システムからの放射線及び化学物質に対する人体の被曝は、移行許容レベル以下であり、放射線や化学的毒性物質に対する被曝からの人体の健康の保護が最適化されること UR2.2(環境の保護) INSの廃棄物管理構成要素からの放射線被曝及び化学性毒物の累積放出量が最適化されること	2.1.1 重要度が高いグループの個人に対する推定照射量 2.1.2 作業員の放射線照射量 2.1.3 作業エリアにおける化学的毒物の推定濃度 廃棄物管理施設からの放射性廃棄物及び化学性毒物の推定放出量	2.1.1 各加盟国の基準へ適合 2.1.2 各加盟国の基準へ適合 2.1.3 各加盟国の基準へ適合 各加盟国の基準への適合
BP3(次世代への負担) INSの放射性廃棄物は次世代へ過度の負担とならないように管理されること	UR3.1(最終状態: End State) 達成可能な最終状態が、異なる改良なしで永久的な安全性が提供できるように、廃棄物の各クラスに対して特定されること。計画されたエネルギーシステムは、廃棄物が合理的な範囲で管理されること。最終状態は、環境に対する危険物質の放出が今日許容できるレベル以下であるようなものであること。 UR3.2(廃棄物管理コストの属性) 寿命中のすべての廃棄物を管理するコストは、寿命中のいかなる段階での管理債務をもカバーできるように、INSからの想定エネルギーコストの中に組み込まれること	3.1.1 技術の利用可能性 3.1.2 必要時間 3.1.3 リソースの利用可能性 3.1.4 最終状態の安全性(重要性が高いグループの個人に対する推定長期照射量) 3.1.5 最終状態に至る時間 コスト評価の中の特定の項目	3.1.1 現在利用可能なすべての技術、あるいは、提案される革新的燃料サイクル導入スケジュールで利用可能であろうと合理的に期待できるすべての技術 3.1.2 技術を産業規模に運ばせるのに必要な時間が、最終状態に達する時間より短くなければならない 3.1.3 エネルギーシステムのサイズと成長速度に適合する最終状態に至るために利用可能なリソース(ファンド、空間、容量など) 3.1.4 各加盟国の規制への適合 3.1.5 合理性をもった現実的な範囲でできるだけ短く
BP4(廃棄物の最適化) 全廃棄物の発生ステップ及び管理ステップ間の相互作用及び相互関係は、長期にわたって運転上の健全性が最適になるように、INS設計の中で予め考慮されていること	UR4.1(廃棄物の分類) INSからの発生する放射性廃棄物は、INSのすべての要素において廃棄物管理を容易にするように、分類されること UR4.2(処分場の廃棄物処理) 廃棄物の発生と最終状態の間の中間ステップが、合理性をもった現実的な範囲でできるだけ早くとられること。これらのステップの設計は、すべての重要な要素(除染、放射線防護、放射線物質の閉じ込めなど)が考慮されるように設計すること。これらのプロセスは、最終状態の達成を阻止する、あるいは、複雑化するものではあってはならない。	廃棄物分類スキーム 最終状態に特定な廃棄物形態をつくるための時間 除染条件、放射線制御策、放射線防護、対策(遮蔽物)、体積・放射線量制限策、廃棄物形態 廃棄物寿命全体を包括するプロセスの記述	スキームは、明瞭で現実的な分離と廃棄物発生量の測定を可能とすること 合理性をもった現実的な範囲で短く 各加盟国の規制当局に規定されている基準 発生から最終状態までの過程の完全なる連続を含み、すべてのステップの実現性を証明するのに十分なこと

Management Safety Fundamentals^{7,20)}の中で、放射性廃棄物管理に関する9つの基本方針を掲げているが、下記の4つのBPはこれらを集約したものである。

BP1: (廃棄物の最小化) INSの放射性廃棄物の発生量は実行可能な範囲で最小とすること

BP2: (人的健康と環境の保護) INSの放射性廃棄物は、時間と場所にかかわらず、人の健康と環境に対する許容保護レベルを保証するように管理されなければならない。

BP3: (次世代への負担) INSの放射性廃棄物は次世代へ過度の負担とならないように管理されること

BP4: (廃棄物の最適化) 全廃棄物の発生ステップおよび管理ステップ間の相互作用および相互関係は、長期にわたって運転上の健全性が最適になるように、INS設計の中であらかじめ考慮されていること

これらのBPにより、INPRO手法は、最終処分場の環境で移動しやすい長寿命核種を含む廃棄物の発生を最小化すること、廃棄物からの放射線および化学物質の被曝を抑えること、すべての廃棄物の最終状態を確定すること、すべての廃棄物を速やかにその最終状態に移すこと、廃棄物を分類し中間のステップが最終状態に到達するまでの妨げにならないようにすること、ライフサイクル全体にわたるすべての廃棄物を管理するための資金を

用意すること、を求めている。

廃棄物管理のCRの例として、次を挙げる。

IN 4.1.1: 廃棄物分類のスキーム

AL 4.1.1: スキームは、発生する廃棄物の明瞭で現実的な分離と測定を可能とすること

このCRにより、INPRO手法は、INSを導入する際にはあらかじめ将来を見越した廃棄物分類スキームを構築するように要求している。

(5) 核拡散抵抗性

第5表に核拡散抵抗性のINPRO評価手法を示す。将来の原子力システムを設計する場合、システムが核兵器製造のために転用される可能性をあらかじめ考慮することが重要である。核拡散抵抗性は、技術固有の特性(Intrinsic features)と制度等による付帯対策(Extrinsic measure)の組合せで高めることができる。固有特性はINSの技術的な設計に由来するものであり、付帯対策をより実施しやすくするものである。付帯対策は原子力に関する政府レベルの決定に基づくものである。

固有特性は、次の技術的な特性から成り立つ。すなわち、(a)製造、使用、輸送、保管、廃棄のいかなるプロセスにおいても、INS中の核物質による核兵器製造計画の魅力を低減すること(例えば、組成比、化学形態、容量および重量、放射線特性といった物理的特性を考慮する)、(b)核物質の拡散を抑制・阻止すること(例えば、核物質を限られた外部接点しか持たない場所へ格納した

第5表 INPRO 評価手法(核拡散抵抗性)

基本原則 (BP: Basic Principles)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (CR: Criteria)	
		評価指標 (IN: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limit)
BP1 核拡散抵抗性を高める特性と対策は、INSが核兵器計画における核分裂性物質獲得の魅力的な手段とならないように、INSの全寿命を通じて堅持されること	UR1.1 核不拡散に関する国の関与、義務、そして政策が適当であること	1.1.1 核不拡散に関する国の関与、義務、政策	1.1.1 国際社会によって許容できるとみなされる関与、義務、及び、義務の1セット
	UR1.2 核兵器計画にとってINSの核物質の魅力度が低いこと。これは、INSで確実に作られるであろう、または、発端されるであろう公表しない核物質の魅力度も含む。	1.2.1 物質の魅力度	1.2.1 ALARP(合理性をもった現実的な範囲)でできるだけ低く)
	UR1.3 核物質の拡散は合理的にみて困難で検出可能であること。拡散は、公表されない核物質の導入、生産、あるいは、発端のためのINS施設の使用も含む。	1.3.1 拡散の難易度と検出性	1.3.1 INSの使用よりは、単独の核兵器計画を行う方が魅力が高くなるような、難易度と検出性(この指標を評価できる手法は現在存在しない)
BP2 技術固有の特性と制度等による付帯対策の双方が必須であり、どちらか一方だけでは十分ではないと考えること	UR2.1 INSは多層の核拡散抵抗特性と対策を組み込むこと	2.1.1 INSが多層の固有特性によりカバーされる範囲。「総論」は可能性のある獲得経路の割合、各獲得経路は適切な検証によりカバーされたと理解される。 2.1.2 獲得経路をカバーするバリアの強固性	2.1 数々が未決定で残る状態。いくつかの固有特性は検証に差効果をもたらすため、この数%の柔軟性をもつことが重要と認識される。 差効果: 多層とはUR1.1でリストされた変数属性の組み合わせを示している 2.1.2 強固性は固有特性をもつ性質上の概念。強固なバリアを築くためには多大な努力と時間を要するため、検出可能である。
	UR2.2 他の設計思想と合致する固有特性と付帯対策の組み合わせが、差効果が高い核拡散抵抗性を提供するように、(設計/エンジニアリング 段階で)最適化されること	2.2.1 核拡散抵抗性を提供するのに必要な固有特性と付帯対策を導入するためのコスト 2.2.2 検証機関 (IAEA、地域の安全保障組織等)と調の面で合意される付帯対策のレベルを保持した検証アプローチ	2.2.1 最小のコスト(核拡散抵抗性の許容レベルはUR1.1によって要求されると理解される) 2.2.2 Yes

り、大容量・重量・高放射線などの特性により検出されることなしに移動することを困難にしたりする)、(c)核兵器に直接転用可能物質の未申告の製造を抑制・阻止する(例えば、炉心内や炉心の近くで未申告のターゲット物質を照射できないように設計された原子炉、未申告のターゲット物質を含んで運転できないようにごくわずかな反応度余裕しかない炉心、改造が困難な燃料サイクル施設やプロセスなど)、(d)核物質の計量や検証を容易にすること(記録の継続性を高めるなど)である。

付帯対策としては、次の5つが定義されている。すなわち、a)国による関与、義務、政策(例えば、核兵器不拡散条約、IAEA 保障措置協定および協定に対する追加議定書など)、b)国際的輸出管理レジーム、c)核物質や原子力技術へのアクセスを制限する商業的、法的、制度的協定、d)IAEAによる検証、あるいは地域レベル、二国間、国内レベルでの検証、e)上記の違反に対する法的・制度的対抗策。

以上に基づき、核拡散抵抗性では以下の2つのBPが定義された。

BP 1 : 核拡散抵抗性を高める特性と対策は、INSが核兵器計画における核分裂性物質獲得の魅力的な手段とならないように、INSの全寿命を通じて堅持されること

BP 2 : 固有の特性と付帯対策の双方が必須であり、どちらか一方だけでは十分ではないと考えること

最初のBPは、固有の特性と付帯対策がINS全寿命にわたって堅持されることを求めており、第2のBPは、そのどちらも不可分であることを述べている。核不拡散のCRの例として以下を挙げる。

IN 1.2.1 : 物質の魅力度

AL 1.2.1 : ALARP(合理性をもった現実的な範囲でできるだけ低く)

ここで魅力度とは、INSで使用される/作られる核物

質が核兵器計画にとってどれだけ魅力があるかを示す指標であり、例えば、核分裂性核種の組成が高いほど、また、崩壊熱を発生する核種の組成が低いほど、その物質は魅力度が高いと考えられる。これに対するALは、ALARP(As low as reasonable practicable)を示すように求められており、評価者はINSの核物質の魅力度が、費用対効果や他の因子への影響を考慮した上でできるだけ低く抑えられていることを示す必要がある。

(6) インフラ

第6表にインフラのINPRO評価手法を示す。将来の原子力導入を促進する、あるいは妨げる要因の多くは、インフラに関わるものである。INPROで定義するインフラとは、法的、制度的、産業上、経済的および社会的インフラ等、原子力施設の建設と運転に必要なすべてのインフラ要素を含んでいる。また、INPROでは、将来のエネルギー需給における発展途上国のシェアの重要性に鑑み、発展途上国における原子力インフラの整備に特に注意を払っている。

この分野のINPRO手法は、基本的に原子力システム運用に際して必要となるインフラが整備されているかどうかをチェックするものとなっているが、唯一のBPでは以下に示すように、これらのインフラ整備が原子力導入にあたっての過度の負担とならないように国際社会も含め各方面に努力を求めている。

BP 1 : 地域および国際的な制度は、いかなる国も国内のインフラに過度の投資なしに、エネルギーと関連生成物の供給のためにINSを採用できるオプションを提供すること。

地域および国際的な制度の例を挙げて、許認可の標準化や多国間での規制当局の共有などが考えられ、INPROではこれらのオプションを積極的に模索するように求めている。

URは、法的・制度的インフラ、経済的・産業インフラ、社会的・政治的インフラに展開され、法的・制度的

第6表 INPRO 評価手法(インフラ)

基本原則 (BP: Basic Principles)	ユーザー要件 (UR: User Requirements)	評価基準 (CR: Criteria)	
		評価指標 (I: Indicators)	許容限度 (AL: Acceptance Limits)
BP1 地域及び国際的な制度は、いかなる国も国内のインフラに過度の投資なしに、エネルギーと関連生産物の供給のためにINSを奨励できるオプションを提供すること	UR1.1(法的、制度的なインフラ) INS設置に先立って、原子力責務、安全性、放射線防護、運転制御、安全確保、核拡散抵抗性をカバーするような個々のレベルの法的制度が確立されること	1.1.1 法的制度が確立されること 1.1.2 安全制度及び放射性防護制度が確立されること	1.1.1と1.1.2 国際基準への適合
	UR1.2(経済上、産業上のインフラ) INS設置を計画している国の産業上、経済上のインフラは、建設及び運転期間を通してプロジェクトをサポートするのに適切であること	1.2.1 運用履歴の利用性 1.2.2 エネルギー生産物への需要及び価格 1.2.3 設置の規模 1.2.4 サポートインフラ 1.2.5 提案された原子力施設の価値(VNU)	1.2.1 プロジェクトをカバーするのに十分であること 1.2.2 ROIを可能とするのに適切であること 1.2.3 地元ニーズに合致していること 1.2.4 内部及び外部で可能であること 1.2.5 VNIとNII、NIは原子力設置をサポートするために必要な量のインフラ投資
	UR1.3(社会的、政治的なインフラ) 計画されるINS設置に対してパブリックアクセプタンスが得られるように、適切な対策がとられること	1.3.1 公衆への情報 1.3.2 意思決定プロセスにおける公衆の参加(パブリックアクセプタンスを育てるために) 1.3.3 長期間のコミットメント 1.3.4 原子力のパブリックアクセプタンス	1.3.1と1.3.2 国際的にもっとも優れた実施例から判断して十分であること 1.3.3 ROIを可能とするのに十分であること 1.3.4 投資に対して政治的リスクあるいは政策リスクが無視できると保証するのに十分であること
	UR1.4(社会的、政治的なインフラ) 運営組織がINSの安全な運転を達成するような安全文化を維持できるように、必要な人的リソースが利用可能であること。運営組織は、レベルの高い顧客となるのに十分なプラント知識を持ち、訓練されたスタッフからなる安定した人員を確保すること。	1.4.1 人的リソースの利用性 1.4.2 安全文化が普及したという証拠 1.4.3 INSの社会に対する利益(BTS)	1.4.1 国際的な経験から判断して十分であること 1.4.2 技術的及び管理分野をカバーする定期的な安全レビューのメカニズムがあること 1.4.3 BTSを必要とされる専門知識を確立し維持するために必要なコスト

インフラでは、原子力法の整備、規制当局の役割、国際条約への批准等のチェック項目がある。経済的・産業インフラでは、十分な資金調達計画、ブランドの適切な規模、原子力導入による間接的な経済効果の検討等の指標があり、社会的・政治的インフラでは、パブリックアクセプタンス、原子力政策の長期的安定度、原子力産業を支える人的資源、安全文化などに関する評価指標がある。CRの例として以下を示す。

IN 1.1.1: 法的制度が確立されること

AL 1.1.1: 国際基準への適合

このCRでは、国際基準と照らし合わせて必要な原子力関連法が整備されること、さらに、核兵器不拡散条約等、原子力関係の国際条約への批准を求めている。

6. INPRO マニュアル整備とワークショップ

前節で述べたINPRO手法は、TECDOC 1434にまとめられているが、その説明の多くがBPのレベル、あるいはURのレベルで行われている。一方、これらの上位概念を理解しながらも、実際のINSの評価はCRのレベルで行う必要があり、TECDOC 1434の記述は十分ではない。例えば、上記インフラのIN 1.1.1の例でいえば、どのような原子力関連法が整備されるべきかTECDOC 1434では明確ではない。

図20(2)以下を目的としたINPRO手法適用のためのマニュアルの作成が進められている。

- CR (IとAL) を評価するための具体的な手順を示す
- CR が実数型の場合は、その数値の具体的な計算手段(推奨コード等)の使用を促す
- CR が論理型の場合は、最終的な Yes あるいは No の判断を助ける詳細評価項目を提示する
- できるだけ例題を提示する
- 関連する IAEA 内外の参考文献を提示する

INPROの手法自体が、技術の開発者に対するシステム分析(Analysis)よりもユーザーに對する評価

(Assessment)に重点をおいた手法であり、マニュアルもその考え方にに基づき記述されている。すなわち、INPRO手法を用いる評価者として、純粋な技術ユーザー(技術を受け入れる国の研究機関、政策決定機関、電力会社等)、純粋な技術サプライヤー(原子力メーカー)、技術サプライヤーかつユーザー(日本などの原子力先進国の国立研究機関や政策決定機関)の3者が考えられるが、INPRO手法では主に評価者として技術ユーザーサイドに視点を置いており、技術サプライヤーが行う分析結果をインプットとして技術ユーザーが評価を行うことを前提としている。例えば、上述した経済性のIN 1.1.1(原子力エネルギーコスト: C_e)は発電コストを示しているが、発電コストを計算するためには、建設コスト、建設期間、割引率、燃料等、他のコストを与える必要がある。建設コストや建設期間は技術サプライヤーがインプットとして技術ユーザーに与えることを前提としている。すなわち、マニュアル内では建設コストの計算手順は範囲外である。更なる例として、安全性のIN 1.5.1(外部環境への放射性物質大量放出の計算上の発生確率)では、PSA(確率論的安全評価)を行う必要があるが、これが行えるのはシステムを詳細に知る技術サプライヤーのみであり、技術ユーザーが行うべきことはPSAが妥当に行われたかチェックし、その値をALと比べるのみである。したがって、PSA計算そのものはマニュアルのスコープ外である。以上のことから、マニュアルの大きな役割のひとつは、技術サプライヤーが与えるべきインプットと技術ユーザーが行うべき評価を明確に区別し、技術ユーザーが何を行うべきか具体的に明示することにある。

マニュアルは、「経済性」、「原子力発電プラント安全性」、「原子力サイクル施設安全性」、「環境」、「廃棄物管理」、「核拡散抵抗性」、「セキュリティ」、「インフラ」および全体をまとめた「概観」の9つの分冊からなる大規模な文書体系である。マニュアルの作成は、2005年初頭から各分冊並行して進められ、現在までINPROメンバー

国にのみ各ドラフトが配布されている。これらは、2007年春に TECDOC として発刊する予定となっている。

INPRO 評価手法の大きなイベントとして、2006年6月、INPRO 手法による INS 評価のためのワークショップを開催した。本ワークショップは、5日間にわたり、INPRO 手法を「セキュリティ」を除く8つのマニュアル(その当時はドラフト版)に基づき詳細に講義したものである。33ヶ国(ECを含む)から39名が受講者として参加し、講師としてはマニュアルの作成者を中心に外部から6名、IAEA 内部から7名を招いた。ワークショップは成功裏に終わり、参加国の INPRO 手法への関心の高さをうかがわせた。

7. INS 評価のためのコンピュータコード開発および IT 利用

INPRO では、評価手法の開発とともに、評価をサポートするコンピュータコードの開発および IT の利用を進めている。本章の2節で述べたように、INS 評価のためには、まず INS 自体を定義する必要がある。INS は原子炉のみならず、フロントおよびバックエンドを含む原子力システムの総体で定義することになっており、コンポーネント間の関係、特に主要物質(核分裂性物質、親物質、マイナーアクチノイド、主要核分裂生成物等)の収支を同位体レベルであらかじめ明確にする必要がある。これらの物質収支は、環境、廃棄物管理、核拡散抵抗性の各分野の評価で用いられる。

INPRO では、物質収支計算のために、DESAE (Dynamic of Energy System-Atomic Energy) コード²⁰⁾を開発しており、メンバー国に提供している。DESAE では、各コンポーネントに対する代表的な数値をデータベースとして持っており、ユーザーはコンポーネントの配備計画をその種類(例えば高速炉)と容量(原子力プラントであれば出力)で時間軸に対してインプットすることで、時間に依存した INS 全体の物質収支を得ることができる。現在、INPRO が他の機関に呼びかけ、他の標準的な物質収支計算コードとのベンチマークが実施されており、精度確証に向けた努力が行われている。DESAE ではさらに、種々のコスト(燃料コスト、建設コスト、O&M コスト)をインプットとして、発電コストや他の経済指標(NPV: 正味現在価値、等)を計算することが可能である。また、INPRO ユーザーは、INS 評価に際し、IAEA の標準コードである MESSAGE(エネルギーシステム計画コード)、MAED(エネルギー需要分析コード)、WASP(エネルギーシステム計画コード)、SIMPACT(環境インパクト評価コード)、VISTA(物質収支計算コード)等を必要に応じて利用することが可能である²⁰⁾。

さらに、INPRO では、INPRO ポータルと呼ばれる INPRO メンバーからのアクセスに限定したウェブサ

ビスを行う予定である。ここでは、INPRO マニュアル等の文書の配布や、INS 評価に参考となる基礎データを提供するとともに、メンバー間で INS 評価に関する情報を交換することができる。また、IV 章で述べる共同プロジェクトに関するメンバー国からの提案も、同ポータルを通じて行い、メンバー間で迅速な情報共有が行われることを目指している。

8. 今後の手法開発計画

今後は、次章で述べるメンバー国による INS 評価スタディの経験・知見を反映して、手法を改良していくとともに、それに対応してマニュアルも改訂していく予定となっている。(森脇正直)

III. メンバー国による INS 評価スタディの実施

1. 各国による INS 評価スタディの概要

現在、INPRO メンバーにより INPRO 手法を実際に適用した INS 評価スタディが行われている。これらの評価スタディの目的は以下の通りである。

- 国レベル、地域レベル、あるいは多国間の原子力計画との中で用いられる INS を持続可能性の観点から評価する
- スタディの経験・知見を反映して INPRO 手法とマニュアルを改良する
- INS を改良するための R&D ニーズを特定し、フェーズ 2 における国際共同プロジェクトの提案へとつなげる

現在、以下に示す11の評価スタディが並行して行われている((6)は完了)。

- (1) 高速炉を用いたクローズド燃料サイクルの合同評価スタディ(ロシア、中国、フランス、インド、日本、韓国、ウクライナ)
- (2) 高温炉に基づく INS 評価(インド)
- (3) 軽水炉から第4世代高速炉への移行に関するスタディ(フランス)
- (4) 2010~2025年における原子力設備容量増加に対する評価(アルゼンチン)
- (5) エネルギー需要が小さい国に対する INS オプションの評価(アルメニア)
- (6) 核拡散抵抗性に関する DUPIC 燃料サイクルの評価(韓国)
- (7) 2つの小型原子炉(INSB FBNR)に対する評価(ブラジル)
- (8) 原子力発電所の経済性評価(プロジェクトファイナンスケース評価)(モロッコ)
- (9) 改良型高温ガス炉の評価(中国)
- (10) 2030年までの国内原子力エネルギー評価スタディ

(ウクライナ)

(11) 資源不足時代のエネルギー需要に対応する INS の評価(ブルガリア, ポーランド, ロシア, スロバキアの協力の下, チェコが実施)

(12) ナトリウム高速炉と鉛高速炉の比較に関する評価スタディ(EC)

この中で, (1)は多数の国が参加するプロジェクトであり, (3)は一通りの評価を終え最終報告まとめの段階にある。さらに, (6)は, 核拡散抵抗性のみ限定した評価であるが, 評価を終了している。以上3つの評価スタディについて, 以下詳細に説明する。(森脇正直)

2. 高速炉を用いたクローズド燃料サイクルの合同評価スタディ

(1) 序

2005年初めより, INPRO 手法を用いた適用研究の一環として「高速炉を用いたクローズド燃料サイクルに基づく革新的原子力システムの INPRO 合同評価スタディ(高速炉サイクル合同評価スタディと呼ぶ)」が実施されている。現在の参加国はカナダ, 中国, フランス, インド, 日本, 韓国, ロシア, ウクライナの8カ国である。

合同評価スタディでは, これまでに各国における原子力利用シナリオと採用する高速炉サイクル技術を同定し, それらに基づき共通設計仕様の概念を設定し, 各国で INPRO 手法を用いて評価を進めている段階である。ここでは, 高速炉サイクル合同評価スタディの Scope とこれまでの成果を中心に紹介する。

(2) 高速炉サイクル合同評価スタディの目的

本合同評価スタディの目的は, 21世紀において持続的なエネルギー供給を提供できる高速炉サイクルについて, INPRO 手法を用いた国際的な評価を通じてユーザー要求に対する適合性のポテンシャルを示し, 高速炉サイクルの特性を明らかにすることである。また, 評価結果を分析し, 国レベル, 地域レベル, 国際レベルにおいて

システムの最適な構成や導入のマイルストーンの決定などを行う。さらに, 高速炉サイクル技術の更なる発展のための研究開発計画の方向性を同定するとともに共同研究協力の推進に資することである。合同評価スタディで得られる知見, 経験を INPRO 評価手法にフィードバックすることにより, 手法の改良整備にも資する。評価の流れを第5図に示す。

(3) 実施手順

3段階に分けて実施している。

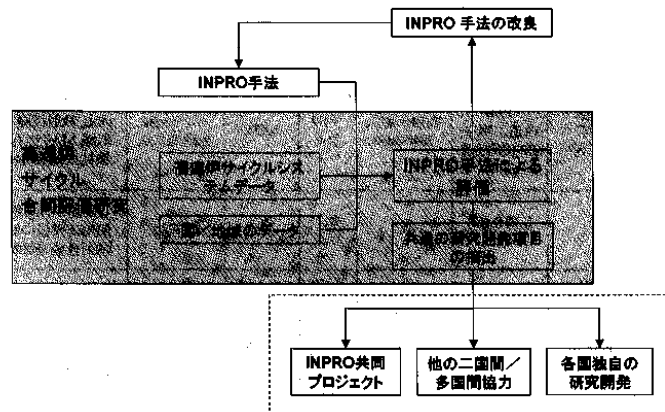
(a) 高速炉サイクルに基づく INS の概念の提示

今後50~100年の原子力発電規模の推移を想定し, 国および世界レベルでの資源, 廃棄物, 資金, インフラ整備, 人材および導入時期の観点から, INS の構成, 境界条件を検討する。検討にあたっては既存の研究もレビューする。INS の技術オプションは, INPRO 手法の客観的適用に合致するよう, 十分に検討が進んだ段階にあるものを評価対象として設定する。このような条件を満足しうる概念を構築するとともに, INPRO 手法を用いて評価するのに必要なパラメータを検討し, 設定する。

この段階では, 高速炉サイクルの構成を提示し, INPRO 評価に関連するパラメータがどういふものであるかを設定することで完結する。

(b) INPRO 手法を用いた INS の評価

INPRO 手法では, 資源の探掘から廃棄物の最終処分までのシステム全体を対象とするが, 高速炉サイクルでは, 高速炉, 再処理, 燃料製造, 廃棄物処理処分が評価の対象となる。各要素のシステム設計等の情報に基づき, 経済性, 安全性, 環境, 廃棄物管理, 核拡散抵抗性, インフラの各要求に対して適合するポテンシャルを評価する。評価する INS の要素について技術的, 経済的, その他の特性およびデータが不足する場合は, 合同評価スタディ参加者からのデータや国際的に認知された情報源も参照する。



第5図 高速炉サイクル合同評価スタディの流れ

経済性、安全性、環境、廃棄物管理、核拡散抵抗性、インフラなどの国別の要求条件や高速炉サイクル技術のパラメータの最適化を行うこととし、国の優先度と固有条件、世界のエネルギー需要に基づいて検討する。

この段階で得られる成果は、高速炉サイクルの要求条件を明らかにするとともに、評価経験から評価手法にフィードバックする事項を抽出し、INPRO手法の更なる改善に寄与する。

(c) 評価したINSの適合性に関する結論の導出と実現に向けての準備

この段階では、評価したINSのユーザー要求に対する適合性に関する結論を導く。また、弱点、想定する技術と現実のギャップ、実施すべきR&D項目からなる技術的解決策とその計画を準備する。これらの計画はINPROという全利用者を対象とし、INSの開発、実証、建設の段階に焦点をあてるとともに、インフラの整備についても検討する。

以上の作業を進めるため、合同評価スタディ参加国は科学技術委員会を設置し、本研究の科学面、運営面の管理を行う。各国は、それぞれ独自に合同評価スタディ支援体制を確立し、各段階の作業は原則として国レベルで

実施し、その結果を科学技術委員会に持ち寄って調整する。これまでに計4回の科学技術委員会が開催された。

(4) 各国の導入シナリオと高速炉サイクル技術

合同評価スタディの参加国は、将来のエネルギー需要の伸びが異なるとともに原子力発電の普及度も異なっている。例えば、インド、中国では原子力容量の大幅な伸びが計画されているのに対し、ロシア、韓国では緩やかな伸び、日本、フランスではほぼ横ばいである。国ごとの高速炉サイクルに関する技術レベルや高速炉サイクルの開発アプローチを第7表に示す。なお、ウクライナとカナダはまだ活動報告がなされていないので、記載していない。

高速炉サイクルに関する各国の計画は2020~2040年ごろには商用炉の導入が可能となるように開発を進めている。2050年断面では、中国、インドの高いエネルギー需要の伸びを背景として、500GWeにも達する市場規模になる可能性がある。また、各国とも開発アプローチには相違点もあるが、おおむねナトリウム冷却炉の導入が想定されている。システムへの要求は各国の事情により、増殖性能、経済性の向上、廃棄物の低減のいずれかに重点を置くかが異なっている。その結果、採用する燃料、

第7表 各国の高速炉サイクルの開発アプローチ

国名	開発の段階			冷却材	燃料	燃料製造/再処理	取り組み内容
	実験炉	原型炉 実証炉	商用規模				
中国	CEFR 建設中	2020-2025	2030-2035	ナトリウム	UO ₂ MOX 金属	ペレット法 射出成型法 先進湿式法 乾式法	高増殖、放射性廃棄物低減(高速燃焼炉とADS)、燃料サイクル施設のコロケーション
フランス	Rapsodie 1967-1983	Phenix 1974 新規高速炉 2020+	Super Phenix 1986-1996 商用炉導入 2030+	ナトリウム、 ガス	MOX 炭化物	ペレット法 先進湿式法 乾式法	放射性廃棄物低減、MA燃焼、水素製造
インド	FBTR 1985 運転中	PFBR 建設中	商用炉導入 2020	ナトリウム	MOX 金属	ペレット法/ 先進湿式法 乾式法	高増殖及び高燃焼度、運転寿命の長期化、建設期間短縮、放射性廃棄物低減、燃料サイクル施設のコロケーション
日本	常陽 1977 運転中	もんじゅ 1994 改修工事中、 JSFR実証炉 2025	商用炉導入 2040-2050	ナトリウム	MOX	ペレット法/ 先進湿式法	経済性向上、安全性向上、放射性廃棄物低減、MAリサイクル、核拡散抵抗性向上
韓国		KALIMER 2030		ナトリウム	金属	乾式法	燃料燃焼率向上、使用済燃料の低減、放射性廃棄物低減
ロシア	BR1 1954、 BR2 1956、 BR5/10 1988-2002、 BOR60 1969 運転中	BN350 1973 試験炉	BN600 1980 運転中、 BN800 建設中 商用炉導入 2020-2025	ナトリウム、 鉛-ビスマス 合金	MOX 炭化物	ペレット法、 振動充填法/ 先進湿式法 乾式法	高燃焼度、経済性向上、建設期間短縮、U資源の有効利用、放射性廃棄物低減、MAリサイクル

設計、技術特性が異なるアプローチをとっている。

日本とフランスは軽水炉の導入が進んでいる一方、今後の原子力発電の伸びは小さいかゼロであると想定している。当面は軽水炉の使用済燃料を再処理し、軽水炉サイクルでのプルトニウム利用を行いつつ、高速炉サイクルへの移行を予定している。ロシアと韓国は、原子力発電の伸びが今後もある程度想定され、新規の軽水炉を導入しつつ、将来、高速炉サイクルへの移行を想定している。これらの4ヵ国に関しては、軽水炉の使用済燃料の蓄積があることから、高速炉システムへの高い増殖性能の要求はない。一方、インドと中国は軽水炉の累積導入量が少ないので、軽水炉から得られる使用済燃料のプルトニウム量が少なく、高速炉を導入するには高速炉の使用済燃料のリサイクルが急務であり、可能な限り大きな増殖性能を必要とする。そのため、現在 MOX 燃料を開発しているが、将来的には大きな増殖性能が期待できる金属燃料へのシフトを行う計画としている。

(5) 合同評価の共通設計概念

各国の高速炉サイクル技術の開発アプローチを踏まえつつ、合同評価スタディのための共通設計概念を設定した。その設計概念は、1,500 MWe プール型ナトリウム冷却高速炉、ペレット型 MOX 燃料、先進湿式再処理等をリファレンスとし、主な変更オプションとして、ループ型(日本)、金属燃料(インド、韓国)、乾式再処理(ロシア、フランス)等の評価を行うこととした。

(6) INPRO 手法を用いた日本の INS 経済性評価の概要

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)において開発を進めている高速増殖炉サイクルを対象に、INPRO 経済性評価手法を用いて評価を行った。

評価対象サイクルとしては、高速増殖ナトリウム冷却炉(増殖比約1.03, MOX 燃料)、および先進湿式再処理、簡素化ペレット燃料製造から構成されるサイクルとし、原子炉についてはマニュアルに従い、初号基ではなく複数基導入後の NOAK (Nth of a kind) プラントを想定し

た。評価に用いた建設費、運転費等の各データについては、原子力機構が実施した「高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究」²²⁾での設計研究に基づいている。

評価の結果、高速増殖炉サイクルによる将来発電コスト(C_w)は19 mill/kWh となり、競合すると想定される LNG ガス複合火力の将来発電コスト(C_g)43 mill/kWh と比較してコスト競争力に優れ、ユーザー要件 U.R 1.1 の許容限度($C_w < k \cdot C_g$)を十分に満たす結果となった。また、他のユーザー要件である投資(U.R 1.2)、投資リスク(U.R 1.3)、柔軟性(U.R 1.4)についても、その許容限度を満たしており、基本原則を十分に満たす能力を有することが示された。

(7) 今後の予定

INPRO 評価に必要なパラメータを検討し、経済性以外の他の評価指標についても適合性を評価する。評価で得られた概念の特性に基づき最適化の方向性を探るとともに、取り組むべき研究開発課題を同定する。国際的な適用性評価から評価手法の改善点の抽出を行うことにより INPRO 手法の改良に資する。(中井良大)

3. 軽水炉から第4世代高速炉への移行に関するスタディ(フランス)

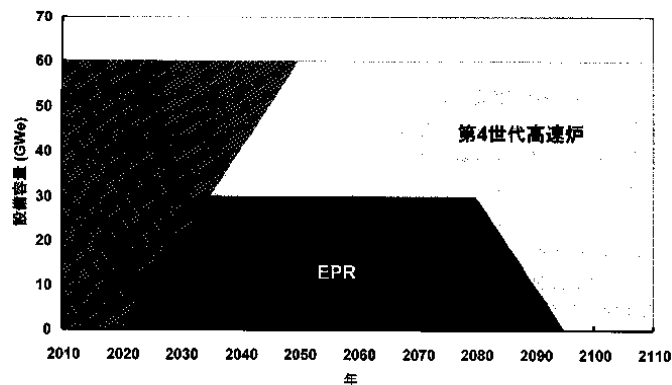
(1) 序

本評価スタディは、INPRO 手法をフランスシナリオに適用したものである。本スタディはすでにその一通りの評価を終えている。本稿では、既発表論文²³⁾とスライド原稿²⁴⁾に基づき、その評価の概要を紹介する。

(2) 移行シナリオおよび INS

フランスシナリオは、第6図に示すように、21世紀の前半に現行 PWR から EPR に移行し、後半にはさらに第4世代高速炉に移行するというものである。シナリオはまた、今世紀中に燃料サイクル施設の更新を行うことも考慮している。

シナリオの開始点は2010年であり、それ以後、全期間で原子力設備容量は60 GWe、発電量は400 TWh/年と



第6図 フランスシナリオにおける原子力構成の推移

仮定されている。開始時点では、この発電量のうち91%がUOX(ウラン酸化物)燃料によって発生し、残りの9%がMOX(プルトニウム/ウラン混合酸化物)燃料によって発生する(共に平均燃焼度45 GWd/t)。2010年までには、プルトニウムインベントリーが以下の構成で250 tに達する。

- 使用済燃料内に180 t(ウラン燃料に115 t, MOX 燃料に60 t, 使用済減損ウラン燃料に5 t)
- 再処理施設に20 t
- 原子炉炉心内に50 t

2013年までには、UOX 燃料と MOX 燃料の平均燃焼度は60 GWd/tに増加する。2020までの使用済 UOX 燃料の再処理では、必要な量だけのプルトニウムが just-in-time で抽出され、それ以外の燃料は再処理されない。再処理の結果、MA(マイナーアクチノイド)と FP(核分裂生成物質)がガラス固化体の形で廃棄物となる。

2020~35年の期間では、50%の原子炉がEPRに更新される。この更新は、1975~85年に建設された初期のPWRの廃炉に伴うもので、EDFの見通しに従い年2 GWeで更新されると仮定されている。また、他のPWRでは40年を超えた寿命延長が期待されている。

2035~40年の期間では、残りの50%の原子炉の更新が第4世代高速炉によって開始される。第4世代高速炉としては、SFR(ナトリウム高速炉)あるいはGFR(ガス冷却高速炉)が設定されている。この期間には第4世代高速炉の使用済MOX燃料からのプルトニウムおよびMAの再処理も開始される。

2080年には、2020に導入されたEPRが始めて第4世代高速炉によって更新される。

(3) INPRO 手法による INS 評価の概要

フランスシナリオをINPRO手法によって評価した結果の概要は以下の通りである。

まず経済性においては、EPRによる発電コストはコンバインドガスサイクル発電に比べて10%から20%安いと評価された。EPRのコストはコンバインドガスサイクル発電には考慮されていない外部コストが考慮されている。第4世代高速炉のコスト目標はEPR並みかそれ以下に設定されている。

安全性に関するEPRの特徴は、過酷事故を防ぎ、その影響を最小化する手段を講じている点である。第4世代高速炉においては、過去や現在の設計・運転で得られた経験を活用して設計されることになる。

環境に対する影響は、EPRにおいても第4世代高速炉においても、国レベル、EUレベル、国際レベルの標準に適合する範囲にある。核分裂性物質の有効利用に関しては、現行の第2世代PWRをEPRに置き換えることにより、ウラン資源が15%節約できる。さらに、第4世代高速炉では、さらに大きくウラン資源を節約することが可能である。

廃棄物処理に関しては、EPRから第4世代高速炉への移行により、廃棄物の量とその管理に大きな前進が得られる。例えば、廃棄物の最小化に関しては、高速スペクトルにより効果的に長寿命核種を消滅することができる。また、将来世代への負担の軽減に関しては、すべてのアクチノイドをリサイクルすることにより、最終処分への負担の軽減が可能である。廃棄物管理の全スキームの最適化に関しては、現行PWRにおいては設計段階ですべて考慮されているわけではないが、第4世代高速炉では設計段階で考慮されることになる。

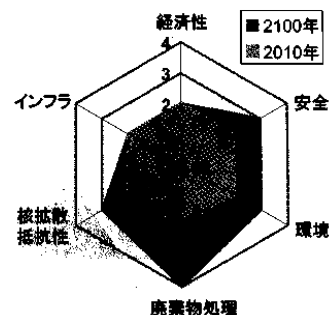
核拡散抵抗性に関して、第4世代高速炉は、増殖比を1に抑え、径方向ブランケットを使わない、すべてのアクチノイドがリサイクルされる、最終的には再処理のみで燃料が供給でき濃縮ウランおよび濃縮施設が不要となる、等の固有の特性を持ち、核兵器転用への魅力を低減する方策を設計段階から取り入れている。また、フランスの保障措置アプローチは、保障措置機関(IAEA、地域内保障措置機関など)と国内規制に整合するような付帯対策をとっており、関与、義務、政策のいずれも国際社会に受け入れられるものである。

インフラに関しては、まず、原子力に対する法体系は十分整っており、安全と放射線防護のための対策は欧州レベルですでに構築されている。産業および経済上のインフラも、原子力施設の建設および運転にとって十分である。社会的・政治的インフラに関しても、すでに高いレベルのパブリックアクセプタンスを得ており、原子力政策の長期的なコミットメントも法により確保されている。また、原子力安全を支える必要十分な人的資源が確保されている。

以上に基づき、第7図にINPRO手法を適用した評価結果の概要を、2010年と2100年との比較で示す。

INPRO手法適用により、第4世代高速炉で構成される2100年は、現行PWRで構成される2010年に比べて、安全性、環境、廃棄物処理、核拡散抵抗性の分野で向上し、包括的に見て持続可能性が向上する結果となった。

(森脇正直)



第7図 フランススタディの評価結果

4. 核拡散抵抗性に関する DUPIC 燃料サイクルの評価(韓国)

(1) 序

本評価スタディは、DUPIC(Direct use of PWR spent fuel in CANDU reactors)燃料サイクルに対し、核拡散抵抗性の分野に限って INPRO 手法を適用したものであり、韓国の KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute)により実施された(カナダは本評価スタディに参加していない)。本評価スタディの目的は、DUPIC 燃料サイクルの核拡散抵抗性が十分であるか評価するとともに、実際の評価により核拡散抵抗性における INPRO 評価手法自体を進化させることにあった。そのため、本スタディは、その結果を核拡散抵抗性分野のマニュアルに反映できるように、マニュアル作成に先立って行われ、2006年5月に終了した。INPRO 内部資料としてすでに報告書²⁶⁾が提出されており、本稿では本報告書に基づきその評価の概要を紹介する。

(2) 評価対象とスコープ

DUPIC は、PWR の使用済燃料から、乾式熱/機械プロセスにより、直接 CANDU 炉用の燃料を製造し、同炉で使用するものである。この過程で、揮発性の核分裂生成物は除去されるが、その他のアクチノイドおよび核分裂生成物は燃料内に閉じ込められる。DUPIC は、天然ウランという低い反応度を持つ燃料でも運転可能という CANDU 炉の特徴を活かしたサイクルといえる。DUPIC では、①PWR からの使用済燃料を削減できる、②ウラン資源を節約できる、③CANDU 炉の燃焼度を高くでき同炉からの使用済燃料も削減できる、というメリットがある。また、本サイクルでは、核分裂性物質の

単独抽出をしない等、高い核拡散抵抗性が期待でき、それが本評価スタディ実施の動機となっている。

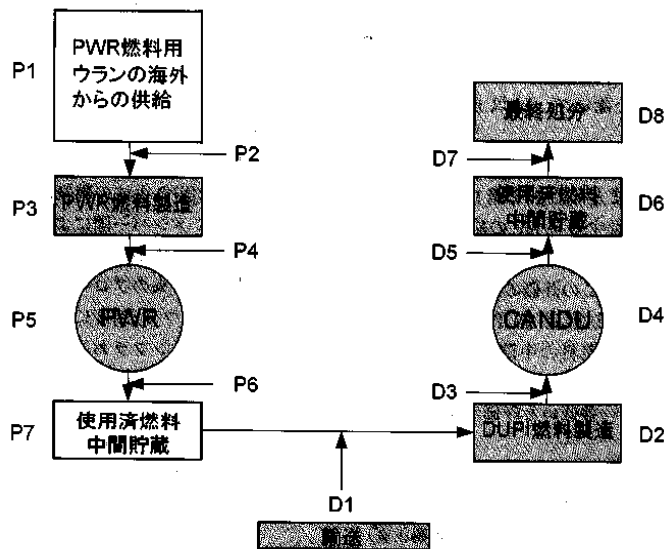
第8図に、DUPIC のステップと本評価スタディにおける評価スコープを示す。DUPIC は、合計15のステップから成り立ち、本評価では、そのうち「PWR 燃料製造(P3)」、「PWR 運転(P5)」、「PWR 使用済燃料の DUPIC 燃料製造施設への輸送(D1)」、「DUPIC 燃料の製造(D2)」、「CANDU 運転(D4)」、「使用済 DUPIC 燃料の中間貯蔵(D6)」、「使用済 DUPIC 燃料の最終処分(D8)」の7つのステップを評価対象としている。

本評価では、DUPIC サイクルの有効性を比較するために、従来の CANDU ワンスルーサイクルに対する評価も行っている。対象となるステップは、「CANDU 新燃料の製造(C3)」、「新燃料の CANDU 炉への輸送(C4)」、「新燃料による CANDU 運転(C5)」、「使用済 CANDU 燃料の最終処分(C7)」である。

(3) 評価手法と評価例

上述したように、本スタディの目的の一つは、INPRO 評価手法を進化させることにあり、本スタディでは評価パラメータ(EV: Evaluation Parameters)という新たな手法に基づき、新たな評価体系が提案されている。EV は、IN の下のレベルに位置するもので、IN の評価を助けるものである。

例えば、新たな評価体系における UR 1.1 は、TECDOC 1434における UR 1.2であり、もともと1つしかなかった IN(物質の魅力度)を4つの IN(物質の量、物質の質、物質の形状、核技術)に展開し、さらに、これらを複数の EV で構成する形とした。第8表に UR 1.1の構成と「DUPIC 燃料の製造(D2)」ステップに対する評価例を



第8図 DUPIC プロセス

第8表 DUPIC 燃料製造(D2)ステップに対する UR 1.1(核物質の魅力度)の評価結果

IN(指標)	EV(評価項目)	No	評価スケール					
			W		S		VS	
			VW	W	M	S		
核物質の特性	高位核組成	$^{239}\text{Pu}/\text{Pu}$ (wt%)	EV1	> 93	80-93	70-80	60-70	
		$^{240}\text{Pu}/\text{Pu}$ (wt%)	EV2	> 90	60-90	20-30	15-20	
		$^{241}\text{Pu}/\text{Pu}$ (wt%)	EV3	< 1	1-100	100-4000	4000-7000	> 7000
	核物質のタイプ		EV4	未照射燃料		低濃縮ウラン	天然ウラン	劣化ウラン
	照射線量	Dose (mSv/hr)	EV5	< 10	10-150		1000-10000	> 10000
	核生成	$^{239}\text{Pu}/\text{Pu}$ (wt%)	EV6	< 0.1	0.1-1		10-80	> 80
	自然核分裂中性子発生率	^{240}Pu , ^{242}Pu (ppm)	EV7	< 1	1-10	10-20		> 50
核物質の量	アイテムの質量 (kg)	EV8	10		100-500	500-1000	> 1000	
	SQになるアイテムの数	EV9	1	1-10		50-100	> 100	
	SQの数(貯蔵状態にあるものは除外)	EV10	> 100	50-100	10-50	10-1	< 1	
核物質の形態	U	EV11	金属	酸化物/溶解物	U化合物		廃棄物	
	Pu	EV12	金属	酸化物/溶解物	Pu化合物		廃棄物	
	Th	EV13	金属	酸化物/溶解物	Th化合物	使用済燃料	廃棄物	
核技術	意味	EV14	Yes					
	核分裂性物質の抽出	EV15	Yes					
	ターゲット照射	EV16	Yes					

*有意量(Significant Quantity):1個の核燃料装填量の製造の可能性を排除し得ない核物質のおおよその量

示す。それぞれのEVは、核拡散抵抗性を、VW(Very Weak), W(Weak), M(Medium), S(Strong), VS(Very Strong)の5つのレベルに分けている。例えば、 ^{239}Pu のプルトニウム中組成比は、60%以下であればVS、93%以上であればVWである。表からは、D2ステップが、「アイテムあたりの質量」を除いて、M以上の核拡散抵抗性を持つことがわかる。

(4) 評価結果例

新 UR 1.1の評価結果をまとめた図を第9図として示す。この図は新 UR 1.1に対する各EVの結果を積み上げたもので、数値が高いほど、そのステップの核拡散抵抗性が高いことを意味する。この評価の結果から、物質の魅力度に関する核拡散抵抗性は、DUPICサイクルのD4プロセス(DUPIC 使用済燃料の中間貯蔵)で一番高く、CANDU ワンススルーサイクルのC4プロセス(CANDU 新燃料の輸送)で一番低いと評価できると韓国レポートは述べている。

今後公表される INPRO マニュアルでは、本評価スタディの提案手法の反映が検討される予定である。

(森脇正直)

IV・フェーズ2

1. フェーズ2の概要¹²⁾

2006年7月に行われた第10回 INPRO 運営委員会において、フェーズ1の終了とフェーズ2の開始が正式に承認され、同月よりINPROはフェーズ2に入った。フェーズ2は大きく3つの方向から構成され、主として以下のタスクから成り立っている。

(方向1: INPRO 手法の継続的改良)

- タスク1: メンバー国による評価スタディ
- タスク2: 評価手法の継続的改良
- タスク3: 将来のグローバル原子力ビジョンの構築

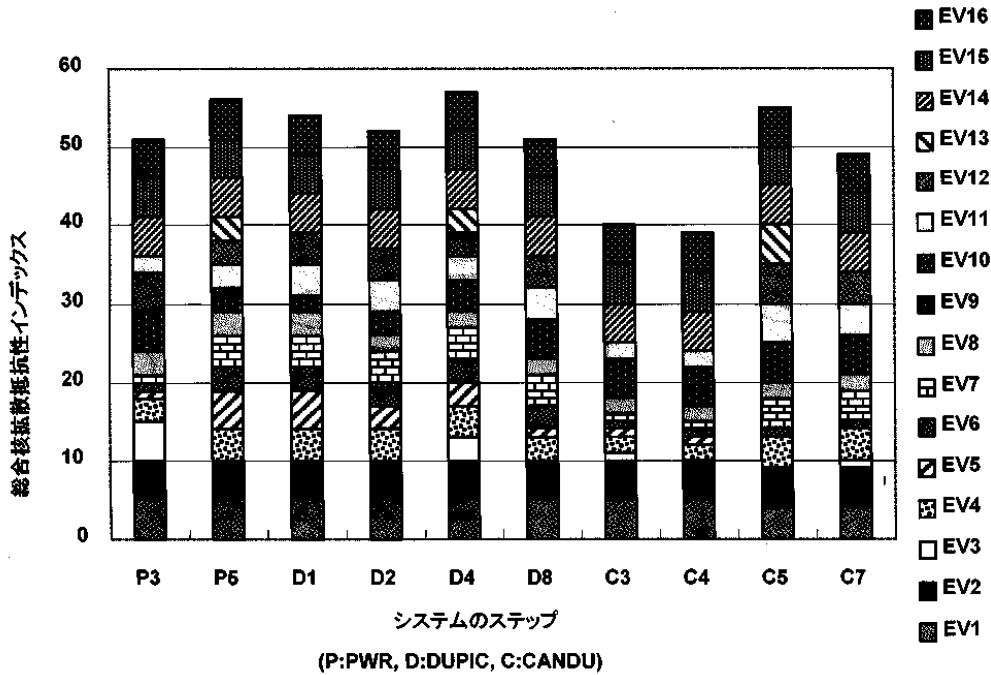
(方向2: インフラ/制度に関する活動)

- タスク4: インフラおよび制度的側面課題への対応策検討

(方向3: 共同プロジェクト(Collaborative Project))

- タスク5: R&D 項目の抽出
- タスク6: 共同プロジェクトの実施
- タスク7: ステークホルダとのコミュニケーション強化

タスク1と2は、第II、III章で述べたように、これまで



第9図 UR 1.1(核物質の魅力度)の総合評価

での中心的な活動であり、今後も継続されるものである。

タスク3と4は、フェーズ-1B(2P)においても計画されていたが実際にはほとんど実施されなかったもので、実質的にフェーズ2における新たな活動となる。タスク3は、今後の原子力発電の、発展の機会と直面する可能性のある課題をグローバルビジョンレポートとして提示しつつ、メンバー国におけるそれぞれのビジョンあるいは原子力開発のシナリオを評価するためのツールを提供してこれを支援するものである。

タスク4は、INSを設置する上での長期的に必要とされるインフラおよび設置を促進するための制度的な側面を検討するもので、正規予算プログラムと連携をとりながら実施される。具体的には、燃料サイクルに関する多国間アプローチや、許認可の国際的な標準化、ファイナンスなど国際的なインフラ/制度の枠組みなどが挙げられる。

タスク5と6は、共同プロジェクト(Collaborative Project)と呼ばれるINPROメンバー間における共同研究・開発に関するもので、次節で詳細を述べる。

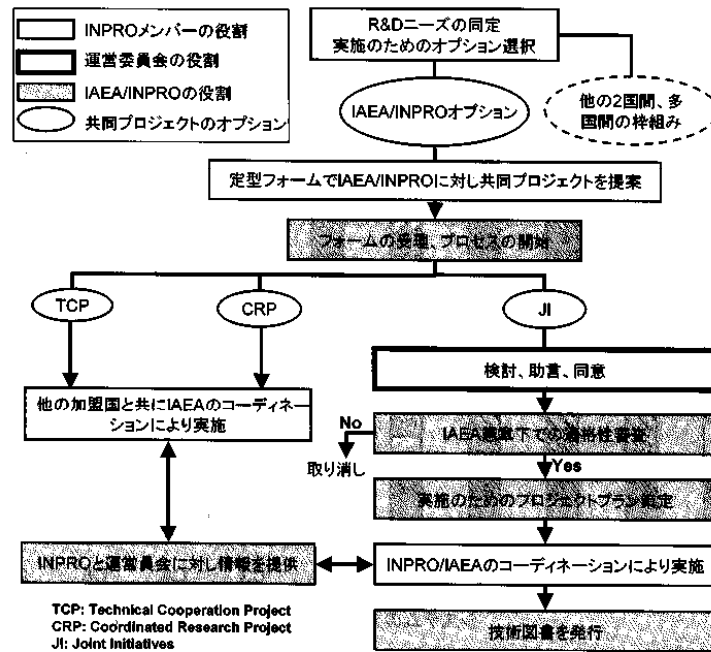
タスク7は、インターネットを活用したINPROメンバーとのコミュニケーション強化や、INPRO関連データベースの開発、INPRO成果を広めるためのワークショップの開催、GIFなど他の国際プロジェクトとの関係強化等が含まれている。

2. 共同プロジェクト(Collaborative Project)

発展途上国のみならず先進国においても、原子力関係のR&D実施のための財源確保は大きな課題である。さらに、R&D実施のための専門的技術・経験がすべて自前で提供できる国も多くない。多国間で財源や専門的技術・経験を共有し、効果的・効率的にR&Dを進めることが望まれる。この分野でのIAEAの役割は、多国間での共同研究・開発の可能性を議論する場を提供し、その実施をコーディネートすることにある。

一般に国際機関に求められ、かつ、実績もある国際共同プロジェクトは、知見の共有、データベースの作成、コードのベンチマーキング、ソフト開発、あるいは共通する課題に対処するための方法論の策定であり、システムや機器の技術開発は一般的とはいえない。IAEAにおける技術開発も、先進国とは合意に基づきIAEAからの資金提供はなく、開発途上国には資金提供はあるもののシードマネー(プロジェクト立ち上げを支援するための小額資金)に過ぎない。すなわち、技術開発を刺激し共通する課題に取り組む情報交換のフォーラムではあっても、特別な基金に寄らない限りシステムや機器の技術開発には至らない。

この中において、INPROにおける共同プロジェクトとは、こうした従来の形態の踏襲を想定しつつも、INPROメンバー間でグループを形成し、資金・人材・



第10図 共同プロジェクトの意思決定フロー

設備を調達し、IAEAにそのプロジェクトのコーディネーションが依頼される場合も想定して、既往のCoordinated Research Projects (CRP), Technical Cooperation Program (TCP)のほかにJoint Initiative (JI)という3つの利用可能なオプションを提供している。CRPは、そのほとんどはIAEAの通常予算とプログラムに基づき各国の研究をコーディネートするものであり、TCPは、主に発展途上国への技術移転を促進するために行われるものであり、確立されたシステムである。JIは、IAEA憲章²⁰⁾の条項Ⅲ A.1およびA.3に基づき原子力平和利用に限定したものであり、かつ、IAEA内の他の活動と重複せず、また、他の国際プロジェクトと相乗効果を得られるものでなければならない。

ただし、すでに運営委員会にて合意されたこの共同プロジェクトの枠組みとして、できるだけ成果を公表すること、GIFとの相乗効果追求、等が定められており、かつ、すでに米仏日などGIFとINPROの両方にメンバーシップを有する国がいくつかあるため、GIFと競合する研究開発に至る事態はないと筆者は考えている。むしろ、異なったINSにおいて共通する課題に対処する方法論と利用可能な技術オプションの検討が主であろうと予測している。

実際のプロジェクト意思決定フロー(第10図参照)に即していえば

- (1) INPROメンバーは、共同プロジェクトとして何を課題にするかニーズを抽出する。INPROがメン

バー国に推奨する方法は、検討対象のINSにINPRO手法を適用してその持続可能性を評価し、CRを満足しない項目、あるいは満足していたとしても相対的に評価が低い項目を抽出し、それを改善するための開発ニーズを抽出するというものである。この方法では、開発ニーズがシステムティックに決定されるため、より客観的で説得力があるものとなりえるという長所がある。INPROメンバーは、共同プロジェクトの課題とともにこれが3つのオプションのどの形態を利用するかを示してIAEAに提示する。

- (2) INPRO運営委員会は、これらの共同プロジェクト案を議論し、意思決定を行う。INPROメンバーに対しニーズを共有するパートナー探しの場をも提供するようになる。
- (3) 実施段階では、IAEA事務局は、コーディネーションの役割を負う。知的所有権はメンバー相互の協定で処理されIAEAが扱うことはない。

第10図での灰色の部分が共同プロジェクトに関してIAEAがINPROメンバーの活動を支援できる部分である。

3. 今後の課題

INS評価手法の整備および今後の活動の領域と枠組み(例えば、共同プロジェクトの枠組み)はおおむね整った。今後は、フェーズ2においてその手法を生かして、

あるいは枠組みの中で具体的などのような目に見える成果を出すのが、最大の課題である。このほか、個々の分野では、至急取り組まねばならない事項に、マニュアルの章間の整合性を図った上でこれをメンバーの使用に供するために公表すること、中小型炉へのユーザー要求をINS評価手法をベースにして整備すること(2006年秋のIAEA総会決議を経たIAEA加盟国による要求事項)、制度的革新のタスクの開始、共同プロジェクトの選定と開始、資金の安定化と要員の充足、などなど多数の課題を認識している。(尾本 彰)

V・我が国とINPRO

1. はじめに

我が国は、GIFについては、原子力機構を中心として、計画開始当初より官、大学、研究所、産業界が協力して参加し、我が国における将来型原子力システムの研究開発に積極的に役立ててきた。INPROについては、インドやパキスタンなどNPT非加盟国が参加していること等の理由から、米国、英国、フランスと歩調を合わせ、計画発足以来、正式参加してこなかった。ただし、原子力機構等より運営委員会や共同研究など専門家会合にオブザーバー参加して情報を入手することにより計画の進展状況を常に把握するとともに、専門家会合では適当な範囲で活動や協力も行ってきた。

2004年5月のフランスのINPRO計画への参加、2005年9月のIAEA総会における米国のINPRO計画参加表明、INPROとGIF間の協力の進展、2005年10月の原子力機構総会出席の状況を踏まえ、我が国のINPRO計画参加への機運が整って来た。

2. 日本の参加体制と活動計画

これを受け、原子力機構からの情報等を基に原子力委員会、文部科学省、経済産業省、外務省で検討した結果、我が国が研究開発を進める革新的原子力システムに関し、我が国がINPROに参加することは、

- (1) 将来の世界のエネルギーのニーズを的確に把握することができる
- (2) INPRO評価手法の利用は、原子力機構の実用化戦略調査研究に有用である
- (3) 国際的な共同研究により、客観性の高い結論を得るとともに研究資源・成果の共有を図ることが可能である
- (4) INPROの活動を通じて、開発途上国も含め我が国に対する幅広い理解を獲得できる

ことから、核不拡散および機微技術の取扱等に留意する条件下、INPRO参加を決定し、INPRO計画に我が国が参加する旨の2006年4月13日付書簡がIAEAに送付された。

我が国のINPRO参加に当たっては、革新的原子力システムに関する研究開発を実施する大学、研究機関、産業界等がINPROメンバーである日本政府を通じて評価スタディ等に参加したり、すでに実施中の原子力機構の評価スタディに参加することが可能である。より具体的には以下の協力的検討を行うこととしている。

(1) INPRO評価スタディ

Ⅲ-2節に既述のように、カナダ、ロシア、フランス、インド、中国、韓国、ウクライナとの共同による「高速炉サイクル合同評価スタディ」に参加し、高速炉サイクルの特性の明確化、国・地域・世界レベルにおけるシステムの最適構成や導入マイルストーンの決定、研究開発方向の同定、共同研究協力の推進、INPRO評価手法の改良等を実施する。

(2) インフラ関連の活動

インフラは、法的・制度的、経済上・産業上、人的資源および社会的・政治的インフラ等から構成されているが、INPRO計画の進捗状況を把握しながら、社会的成熟度の評価、INS導入に当たっての仕組み作り、高速炉サイクルを効率的に実現する上で必要とされるインフラづくりとそのマイルストーンの設定、ロードマップの作成など、上述の「高速炉サイクル合同評価スタディ」の中での実施に関連して検討する。

(3) 人員派遣、資金提供

INPROの運営委員会、各種専門家会合へ日本政府、原子力機構等から専門家を派遣する。また、CFEの派遣の可能性についても検討する。IAEAへのINPRO参加書簡では資金提供については触れていないが、わが国にとっても興味深いフェーズ2で共同プロジェクトに正式に参加したことから、将来にわたってその可能性を検討していく。

(4) その他

(a) 高温ガス炉関係

持続的発展と環境保全の観点から、原子力機構が研究開発を進めている高温ガス炉を用いた水素製造システム等の核熱利用に関する共同研究課題の探索および専門家会合への参加等を検討する。

(b) ビジョン/シナリオ解析

世界ないし地域レベルにおける持続的発展の観点からの革新的原子力システムの導入によるエネルギー戦略の分析、評価について、国内研究機関が有する解析ツールを用いた解析などの実施可能性について検討する。

3. INPROへの期待と我が国の貢献

原子力委員会が2005年10月に策定した原子力政策大綱では、特に、高速増殖炉サイクルなど革新的な技術システムの研究開発の着実な推進を推奨するとともに、IAEA等の国際機関を国際社会における原子力の平和利用活動の公共インフラに位置付け、その活動に立案段階

から参加することの重要性を考慮しつつ、積極的に関与していくべき、としている。

我が国が推進してきた高速増殖炉サイクルや高温ガス炉などの革新的原子力システムの研究開発は、今や世界のトップレベルにあり、GIFにおいて大きな貢献を果たしつつある。我が国が技術ホルダーとしてINPROに参加するに当たっては、技術ユーザーのニーズを的確に把握できること、GIFとの重複を避けた強い補完性と高い協調性を保つこと、客観的なINPRO評価手法が確立されることなど、INPROフォーラムが適切に運営されることを期待したい。

そのため、我が国はINPRO評価スタディを中心とした技術的貢献や人的貢献を果たすとともに、基準や制度の革新など革新的原子力システムに関する国際ルール作りにも積極的に貢献することが適切と考える。

(杉本 純)

VI. おわりに

INPROの目指すものは何か、GIFとの関係はどうなっているのか、今までの活動成果は何か、今後はどの分野で活動が計画されているのか、というたびたびINPRO関係者に発せられる質問に答えるように、INPROについての解説を試みた。INPROは、原子力が人類社会の発展に有為な貢献をするためには、各国が協力した形での一層の技術と制度の革新が必要との考えから、IAEAがINPROメンバーと進めてきたプロジェクトである。その成果をメンバーである日本が効果的に利用し、かつ、今後は、INPROの3つの活動分野それぞれにおいて日本からの有意な貢献あることをIAEAのINPROに携わるスタッフ一同は大いに期待している。

なお、INPROの進捗状況は専用のウェブサイト(<http://www.iaea.org/INPRO.html>)で確認でき、関連するIAEAでの活動もIAEA原子力発電部が3ヶ月に一度発行するニュースレター(<http://www.iaea.org/NuclearPower/>)にても知ることができる。

(尾本 彰)

参考文献

- 1) BRUNTLAND COMMISSION, World Commission on Environment and Development, *OUR Common Future*, Oxford University Press, Oxford, (1987).
- 2) *Indicator for Sustainable Development; Guidance and Methodology*, IAEA, (2003).
- 3) A. Omoto, "Nuclear Energy and Sustainable Development", 11th Brazilian Conference on CBE, August 2006. (2006).
- 4) Rixin Kang, ANNC, "Promoting Nuclear Power, Achieving Sustainable Development of Nuclear Industry in China", *15th PNRC Conf.*, Sydney, October 2006, (2006).
- 5) *Nu Power*, Vol. 18, No. 2-3, (2004).
- 6) F. Depisch, *et al.*, "Overview of results of INPRO phase 1A", *ICONE 11*, April 2003.
- 7) J. Kupitz, "International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)", *ICAPP 03*, May 2003, 3110, (2003).
- 8) IAEA, *Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, Report of Phase 1A of INPRO*, IAEA-TECDOC-1362, (2003).
- 9) R. Steur, *et al.*, "The status of INPRO and the ongoing activities of the phase 1B of INPRO", *ICONE-12*, April 2004, (2004).
- 10) *Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*, IAEA-TECDOC-1434, (2004).
- 11) F. Depisch, Y. Sokolov, *et al.*, "The IAEA International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO): Status and Outlook", *ICONE 13*, 89638, Miami, USA, July 2006. (2006).
- 12) A. Omoto, "International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles", *PNRC Conf.*, October 2006, (2006).
- 13) G8 Summit statement, "Global Energy Security", St. Petersburg, 16 July 2006.
- 14) *Nuclear Energy for Sustainable Development Perspective*, OECD, (2004).
- 15) H.H. Rogner, *et al.*, "Energy Modeling and Comparative Assessment Beyond the Market", *5th Int. Conf. on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Grids*, Dubrovnik, April 2004, (2004).
- 16) F. Depisch, P. Melillo, *et al.*, "An example of an INPRO assessment of an INS in the area of economics", *ICONE 14*, Miami, USA, July 2006, 89639, (2006).
- 17) B. Raj, Y. Busturin, *et al.*, "An example of an INPRO assessment of an INS in the area of safety of fuel cycle Installations", *ICONE 14*, Miami, USA, July 2006, 89850, (2006).
- 18) M. Moriwaki, R. Dones, *et al.*, "Development of INPRO methodology in the area of environment", *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 94, 209-271, (2006).
- 19) F. Depisch, C. Allan, *et al.*, "An example of an INPRO assessment of an INS in the area of waste management", *ICONE 14*, Miami, USA, July 2006, 89840, (2006).
- 20) IAEA, *Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals*, Safety Series No. 111-F, (1995).
- 21) V. Tsibulskiy, M. Khoroshev, *et al.*, "DESAE (Dynamic

Energy System- Atomic Energy) Integrated Computer Model For Performing Global Analysis in INPRO Assessment Studies", *ICONE 14*, Miami, USA, July 2006, 89865, (2006).

- 22) 日本原子力研究開発機構, 日本原子力発電(株), 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究—フェーズII最終報告書, JAEA-Evaluation 2006-002, (2006).
- 23) A. Vasile, G.L. Fiorini, *et al.*, "Assessment of a French scenario with the INPRO methodology", *ICAPP 06*, Reno, USA, June 2006, 6329, (2006).
- 24) A. Vasile, Presentation slides of "Assessment of a French scenario with the INPRO methodology", *ICAPP 06*, 6329, Reno, USA, June 2006 (not available in public).
- 25) M.S. Yang, J.H. Park, "Korean Assessment of the Proliferation Resistance on the Whole Fuel Cycle of DUPIC", Internal INPRO report (2006) (not available in public).
- 26) Statute of IAEA, <http://www.iaea.org/About/statute.html>
- 27) X. Yan, K. Kunitomi, *et al.*, *GTHTTR 300 Design Variants for Production of Electricity, Hydrogen or Both, Nuclear Production of Hydrogen*, NEA, No.6122, 121-139 (2006).
- 28) 原子力委員会, 原子力政策大綱, 平成17年10月.

著者紹介

尾本 彰(おもと・あきら)



国際原子力機関(IAEA)原子力発電部
(専門分野/関心分野)原子力安全/技術開発
と原子力利用のインフラ整備

森脇 正直(もりわき・まさなお)



国際原子力機関(IAEA)
(専門分野/関心分野)原子炉物理・炉工学/
国際プロジェクトの推進

杉本 純(すぎもと・じゅん)



日本原子力研究開発機構 ウィーン事務所
(専門分野/関心分野)伝熱流動, シビアア
クシデント挙動, システム安全

中井 良大(なかい・りょうだい)



日本原子力研究開発機構 次世代原子力シ
ステム研究開発部門
(専門分野/関心分野)高速炉システム工
学, 高速炉安全性, 確率論的安全評価, 高
速炉サイクルを対象とした INPRO 評価