

原子力関連分野でのインドとの交流について

京都大学原子炉実験所

山名 元

1. 緒言

原子力委員会・国際問題懇談会では、インドの原子力を巡る現状認識、インドに関する核不拡散や保障措置の問題、米国とインドの関係、我が国とインドとの協力、などについて包括的に議論されてきたと理解している。京都大学ではインドの原子力系の研究者と個別の交流を持ってきた経緯があるが、このような個別の交流から得た情報などを参考に、インドとの原子力分野での関係について、特に、高速増殖炉開発及び核燃料サイクル開発に関して、主に技術的な視点からコメントしたい。

2. 大学によるインドとの交流など

京都大学におけるインドの研究者との交流は、トリウム燃料の研究に関して行われてきた。京大でのトリウム燃料に関する研究については、文部科学省科学研究費補助金総合研究の、(1) “21世紀のエネルギー源としてのトリウムに関する総合的研究”（昭和63～平成1、研究代表者・木村逸郎教授）、及び、(2) “21世紀以降の有望なエネルギー源としてのトリウムサイクルに関する総合的研究”（平成2～平成4、研究代表者・木村逸郎教授）、(3) 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業準備研究“トリウム燃料サイクル及び加速器駆動未臨界炉基礎研究のための予備研究”（平成10年～11年、リーダー・H10木村逸郎、H11代谷誠治）により行われてきた。木村教授（現、(株)原子力安全システム研究所・技術システム研究所長）は、インドとの積極的な研究交流を行っている。その後も、京大原子炉ではKUCAを使ったトリウム燃料の研究を進めてきたが、その一環として、担当研究者がインドのBARCの研究者と炉物理分野での交流を続けてきた。筆者は、熔融塩化学の分野でインドの研究者と個人的な付き合いを続けてきたが、2003年のIGCARにて開催された“第14回インド原子力学会年大会(INSAC 2003、2003年12月)”に招待講演者として参加している。木村教授の退任後の研究交流は、このような研究者の個人的な情報交換レベルのものに近く、公式の交流などは行われていない。最近は、インドの原子力への着目から、日本原子力学会が主催した将来原子力に関わる国際会議“GLOBAL 2007（2005年9月、つくば市）”に、IGCARの材料・化学・再処理グループ部門の部長 Dr. Baldev Raj を招聘するなどの交流を行っている。

IGCAR (Indira Gandhi Centre for Atomic Research)

3. インドの原子力関連技術のポテンシャル

3.1 着目すべき課題など

インドは、NPT 問題により外国との原子力技術や原子力資材のやりとりがない中で、独自の原子力プラントと独自の技術開発を進めて来た国である。以下に、原子炉や核燃料サイクルの技術に関して、我が国にとって着目すべきインドの技術や経験をリストアップした。

(1)PHWR（加圧水型重水炉）経験

- 運転・保守・安全情報など（WANO 関連情報など）

(2)PHWR 用の MOX 燃料の製造経験

- PHWR 燃料の改良開発経緯

(3)高速増殖炉開発

- 実験炉 FBTR の長期運転経験
- 高速原型炉 PFBR の設計開発及び機器開発成果（建設中）
- 関連する照射試験、要素技術開発、基礎研究など
- 関連する周辺技術など
- 高速炉燃料サイクル技術（湿式再処理、燃料製造）

(4)U-Pu 燃料湿式再処理の経験と今後の再処理の設計開発

- Tarapur 再処理工場の運転経験
- Kalpakkam 再処理ラインの運転経験
- PFBR 用再処理ラインの設計開発情報
- 湿式再処理研究開発の成果

(5)乾式再処理

- 金属燃料製造の基礎実験成果

(6)トリウム燃料利用開発の経験

- 新型重水炉（AHWR）の設計開発情報
- トリウム燃料の開発製造経験
- トリウム燃料及び ^{233}U 燃料の利用経験
- トリウム燃料湿式再処理の経験

(7)いくつかの先進的な燃料サイクル技術への取り組み

- ADS や水素製造に関わる研究成果

(8)基礎研究

- 燃料物性基礎情報
- 炭化物燃料の特性や照射特性の情報
- 材料開発と材料物基礎情報
- 核データや臨界データ
- 化学基礎情報

(9)研究施設

- 照射炉としての FBTR
- 臨界実験装置としての KAMINI
- ホットラボなど

(10)インド国内の周辺産業の情報（参考情報として）

- ウラン採掘及び精錬産業(UCIL 等)
- 燃料製造事業
- エンジニアリング産業
- センサーや放射線計測装置、分析装置等
- 金属精錬
- 遠隔技術や計装制御装置
- コンピュータ関連産業

インドの原子力技術は、独自開発であるとは言えかなりの部分が海外の経験や公開情報などを利用しそれを基にして開発されているので、我が国が喫緊に必要とするような珍しい技術課題は少ないと言える。一方、独自に工学的な試行錯誤を行いながら蓄積してきた工学的な実績や経験、その基となっている基礎情報などは、我が国にとっての補強情報になるものも多い。また、高速増殖炉開発の規模としては、インドは我が国の先を進んでおり、その知見が我が国にとって有用であるのは間違いない。トリウム燃料関連や炭化物燃料関連の情報は、我が国が直ぐに必要とするものではないが、今後の長期的な研究課題として利用出来るものである。また、インドで独特に運営されてきた原子力発電所のトラブルや改良の経験などはグローバルな原子力安全確保の基礎情報として有用であるが、これについては、WANOにより情報共有が進みつつあるものと理解する。

3.2 研究成果公表の傾向に見るインドの研究開発活動度

インドの原子力技術は、あまりポピュラーではないと思われているが、実際には、かなり精力的に公表されている。次表は、学術文献データベースにより、我が国やインドを含む7つの原子力開発国が1995年以降に、高速炉、再処理、MOX燃料製造、放射性廃棄物というキーワードでどの程度の学術論文発表を行っているかを調べたものである（ISI Web of knowledgeによる。トピックスにキーワードを指定して国別に検索した結果）。数値は論文数であるが、数の大きさは、研究活動の活性度や規模を示すと共に、成果公表の活動度も示すと考えて良い。高速増殖炉分野については、インドはフランス並みの実績を持ち、中国や韓国やロシアを十分に越える。再処理分野では、日米仏露よりかなり規模が小さいもののある程度の成果を出している。MOX燃料についても、かなりの成果を公表している。核データやアクチニド関連研究のような特定の基礎研究についても、かなりの成果を公表している。インドの、研究開発や成果公開の活動度は、他の原子力推進国と肩を並べるレベルであることが分かる。

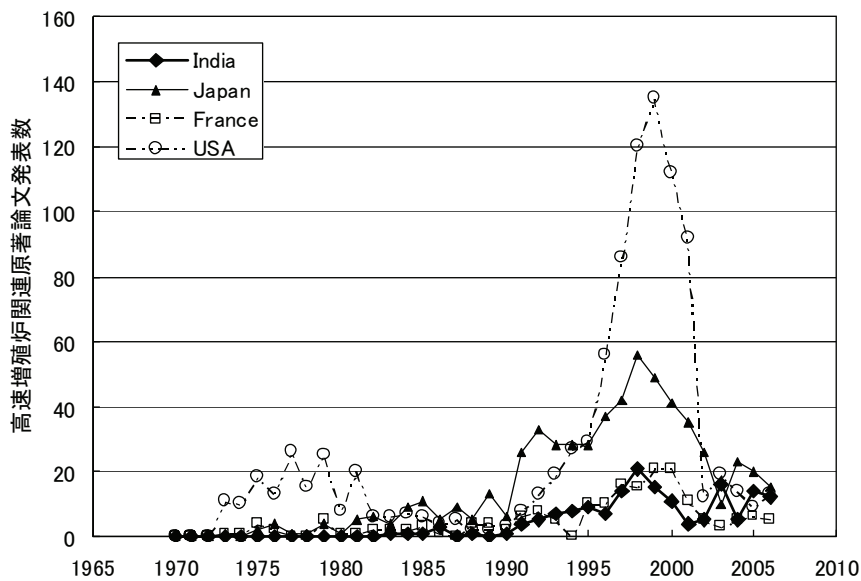
表一 研究課題別の学術論文発表数（1995-2007）

ISI Web of Knowledge によるキーワード検索の結果

1995-2007	インド	日本	米国	フランス	中国	韓国	ロシア
Fast Breeder Reactor/FBR	136	392	707	128	65	37	50
Reprocessing	91	311	684	280	52	32	130
MOX/Mixed Oxide Fuel	643	1749	2584	1023	1056	516	312
Radioactive Waste	89	325	1050	302	52	86	181

1995-2007	インド	日本	米国	フランス	中国	韓国	ロシア
Nuclear Data	863	3167	19464	3769	1399	836	2167
Actinide/Actinoid	115	295	1089	390	80	29	203
Thorium Fuel	42	31	67	24	3	7	15

高速増殖炉関連の論文公表数（FBR と Fast Breeder Reactor をキーワードに含む論文の数）の傾向を、次図に示した。インドは、PFBR（Prototype Fast Breeder Reactor）の建設を進めてきただけあって、ここ数年他の国と互角の発表を行っている。特に、最近では、2003年の Nuclear Energy Science and Technology の発行や、インドの原子炉技術



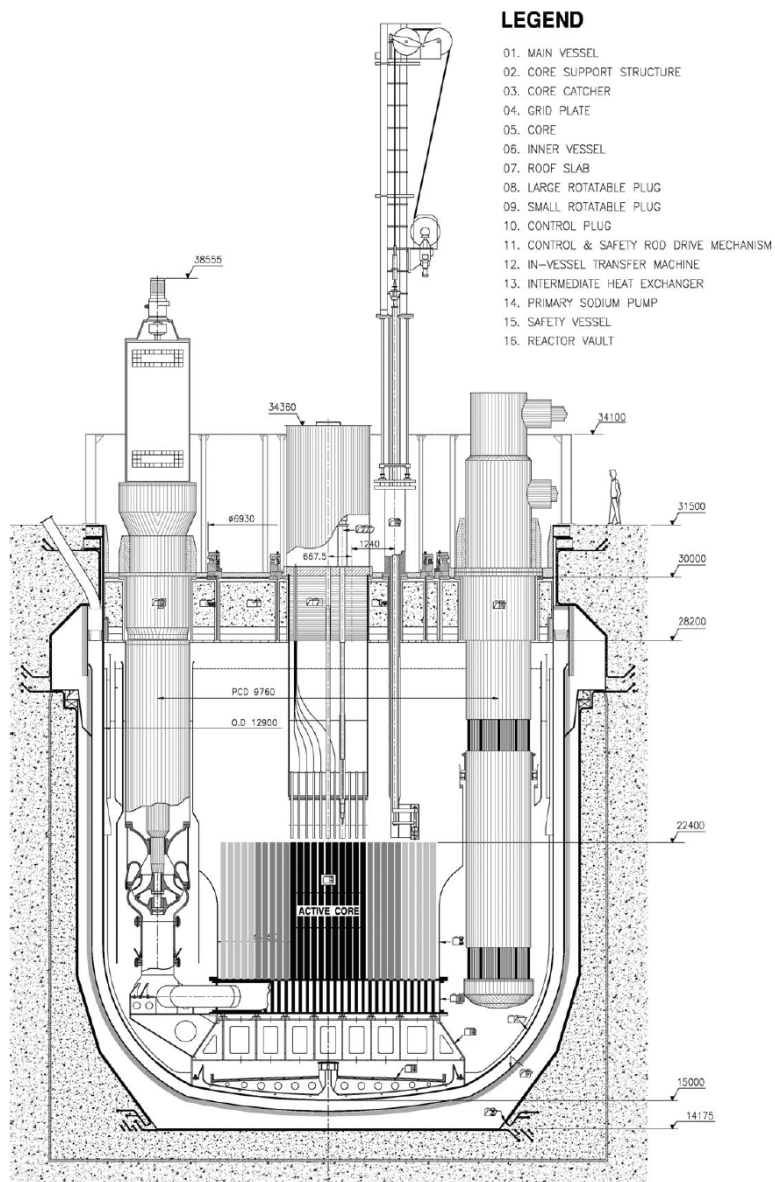
図一 高速増殖炉関連論文数の推移

の特集号と思われる Nuclear Engineering and Design 236 (2006)を発行するなど、積極的な発表が目立つ。また、インドは、IAEAが進める INPRO(International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles)に参画しているが、その中でも、一部のタスクにおいて主導的な役割を果たしており、国際的に外に向けた姿勢を指向しているように見える。

3.3 高速増殖炉

インドでは、1972年5月に国産高速臨界実験装置プルニマ1号炉（二酸化プルトニウム燃料、低出力）を完成した後、IGCAR内に熱出力4万kW、電気出力1.32万kWの高速増殖実験炉FBTR（ウラン・プルトニウム混合炭化物燃料、Na冷却、ループ型）が1985年10月に臨界に達成した。1997年7月には、送電網に送電を開始している。FBTRは1993年3月末までにI型炉心（PuC70%、UC30%）、混合炭化物燃料集合体29体、最

S.C. Chetal et al. / Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 852–860



図一2 PFBR Reactor Assembly (S. C. Chetal et al., Nuclear Engineering and Design 236 (2006) 852-860)

高燃料燃焼度 49, 000MWd/t、累積運転時間 21, 150 時間、このうち高出力（8～11.5MWt）7, 130 時間を達成している。2003 年より IGCAR に PFBR（Prototype Fast Breeder Reactor）を建設中である（図一2）。PFBR は電気出力 50 MWe のタンク型高速増殖炉であり、2010 年に運転開始を予定している。表一2 におおよその設計諸元を示した。

PFBR は、①単位出力当たりの金属材料量を少量化していること、②単位出力当たりの Na インベントリが少ない、③ループ数を 2 ループとして機器数を削減、④強化コンクリート製の四角い炉格納容器、⑤9Cr-1Mo 材による直管蒸気発生器の使用、⑥遠隔 ISI 技術の採用、などの特徴により、タンク型の先行炉である、SPX、BN-600、BN-800 とは異なる設計で作られている。我が国におけるもんじゅの運転再開や、高速炉実用化開発の先行例として重要な位置づけになるであろう。

表一2 PFBR の設計諸元

熱出力	MWt	1250
電気出力	Mwe	500
炉心高さ	mm	1000
炉心直径	mm	1900
燃料		(Pu-U)O ₂
集合体ピン本数		217
燃料ピン外径	mm	6.6
最高中性子束	n/cm ² /s	8X10 ¹⁵
燃料クラッド材料		20% CW D9
吸収材		enr.B ₄ C
一次冷却系		Pool
同入口温度	K	670
同出口温度	K	820
蒸気温度	K	766
蒸気圧力	Mpa	16.6
格納建屋		RCC 長方形
設計寿命	年	40

3.4 再処理技術及び高速炉燃料技術

BARC（Trombay）の再処理工場は、1964 年から金属ウラン燃料の再処理を行った古いプラントである（30 t/y）。CIRUS（研究炉）の使用済燃料の再処理により Pu を回収し、1974 年に行われた核兵器実験に供給した事で有名であるが、軽水炉燃料の再処理技術が進んだ我が国にとって、Trombay の再処理施設にはさしたる技術上の価値は無いと言って良いであろう。Tarapur の再処理工場（100t/y）及び、Kalpakkam の再処理工場（100 t/y）は PHWR の使用済燃料の再処理の経験を有しているが、PUREX 再処理技術としては、我が国の東海再処理工場や六ヶ所再処理工場を凌駕するようなものではないと思われる。工場運転経験やトラブルの経験などの運転経験に基づく情報は我が国にとっても参考になるかもしれない。IGCAR では、トリウムや MOX 燃料を用いた AHWR(Advanced

Heavy Water Reactor)の使用済燃料再処理の技術開発を進めており、この基礎となっている情報（溶媒抽出フローシート設計、燃料溶解工程の設計、その他）については、我が国においても参考となるであろう。また、FBTRの炭化物燃料の再処理経験、や、現在PFBRの使用済燃料再処理ラインの設計開発情報は、我が国での高速炉使用済燃料再処理技術の開発の参考になると思われる。

3.5 その他の技術

材料開発などの基盤技術については、インドはかなり広い知見と経験を持っていると考えられる。特に、物性測定や化学基礎データの獲得、分析技術、材料の開発、センサー技術などの分野では、かなり高度な技術を保有していると見える。筆者が見てきたテーマの例としては、燃料の高温化学データの採取、高速炉冷却材用のセンサー開発などをあげることが出来る。周辺基盤技術や基礎データは、インドに期待出来るのではないかと。より詳細な情報が必要である。

3.6 トリウム燃料利用技術

我が国においては、トリウム燃料の利用の研究は非主流であり大学が細々と進めてきたものであるが、トリウム燃料を積極的に利用することで、現在の燃料サイクルを改良してゆける可能性がある。軽水炉でのプルサーマルへのトリウムベース燃料の利用（Radokowsky燃料コンセプト等）や、高速炉におけるマイナーアクチニド燃料の燃焼用ターゲット燃料のマトリックス材としてのトリウムの利用、などがこれである。このようなトリウム燃料利用の可能性を探る研究を行うためには、インドの技術情報は大変有用である。

4. インドとの技術交流の可能性や課題について

4.1 兵器開発と平和利用の境界の問題

IGCARは基本的に、原子力平和利用のための研究所であり、BARCは兵器開発と密接に関係した研究所であると考えられている。米印合意では、民生/軍事分離を基本として、保障措置の適用、研究炉CIRUSの閉鎖などを含んでいるが、研究施設の軍事目的利用だけの問題ではなく、軍事と民生の間の「技術汚」の問題が存在するはずである。インド原子力学会は国家開発と一体を呈しており、軍事と民政のハード的な区別はついたとしても、ソフト的な区別はつき難いと思われる。データの流通や人事交流を介しての軍事・民生の技術汚染の可能性については今後も注意が必要である。もっともこの問題は、NPT加盟兵器保有国（米、英、露、中、仏）においても当然ながら存在している問題であるのはもちろんである。

4.2 インド人研究者の受け入れ

IGCAR の技術者が京大実験炉に対して、いくつかの研究分野（化学や核物理など）で留学したい旨の打診をして来た事がある。JSPS のフェローシッププログラムに 3 人応募したがいずれも採用はされていない。インドから日本の大学への留学希望は他の大学にもしばしば来ていると聞く。このような留学希望の場合には、原子力関連分野といっても基礎研究あるいは学術研究の範囲に限る事が多い。大学では、基本的には原子力技術の工学開発そのものを行っていることは少なく、原子力応用を念頭に置きながらも、基礎化学研究や炉物理研究などの基礎研究や ADS 研究や超将来的なテーマに取り組んでおり、インドからの日本の大学への留学生が原子力技術に直接接する機会は実際にはほとんどない。JAEA 施設や原子力発電所に接する事を制限すれば、基礎研究目的の大学への留学については、緩和出来るのではないだろうか。

4.3 インドとの研究協力の可能性について

IGCAR のリーダークラスの研究者と、日本との協力について個人的に話しあった事があるが、先方の意見は次のようなものであった。

- インドは、高速炉を指向する国の一つとして、日本の燃料サイクル開発に興味を持ち続けて来た。TWGFR や GLOBAL などの国際会議において、日本や他国から公表された技術情報は大変有益であった。この分野での情報交換と両国の協力は、両者にとって有益である。
- 高速炉が将来的な持続可能な唯一のエネルギーであるという認識の下に、高速炉サイクル開発を指向する国が、経済的で頑強なシステムを構築するために、広い強力体制を構築すべきである。インドは、IAEA の INPRO においても国際協力の願いを表明してきた。（インド・日本の 2 国間協力というよりは、米仏日印のようなマルチラテラルな連携を主張している）
- 様々な研究課題の中でも、「高速炉の安全性」と「燃料サイクル技術」が重要である。さしあたり、運転経験の共有が相互協力の取掛りになるであろう。
- 「日本の常陽」と「インドの FBTR」の運転経験と安全性の情報共有のための会合を開くということを考えてはどうか。他の分野での協力については、相互訪問や議論を通じて具体化できるだろう。

基本的には、情報交換を希望していると言って良い。インドが PFBR を建設し運転しようとしている現在、我が国の常陽やもんじゅ等の高速増殖炉技術の情報がインドに伝わる事に関して、我が国としてのデメリットはあまりないのではないかと。むしろ、FBTR、PFBR、及び、高速炉燃料再処理の技術情報をインドから得ることのメリットは否定できない。開発のリスク分散を図るという観点からも、インドの存在は無視できないであろう。更に、米仏がインドと協力的な研究交流を実現するとなると、実用化高速炉開発に関して、

日本版ループ型高速増殖炉概念のグローバルスタンダード化を狙う我が国にとっては（GNEP への提案など）、技術的な機会を逸する可能性も出てくる。インドとの研究開発協力は、高速炉開発を巡る世界的な体制構築の一貫として捉える必要があるのではないかと考える。

また、我が国の高速炉開発には長期の照射試験が必要となるが、照射マシンタイムの不足が、今後の開発のボトルネックとなる懸念がある。FBTRを照射炉として利用することで、我が国での研究開発装置の容量の不足を補える可能性がある。フランスや米国も同様の期待を持つであろう。インドにおいては安全規制面で試験を進めやすいことも、我が国にとってはプラスに働く。

5. まとめ

- 京都大学は、インドの原子力関係機関と学術的な交流を行ってきた経緯があるが、現在は公式かつ規模の大きなものはなく、個人レベルでの交流が続いている。従来の交流の主流はトリウム燃料利用に関わるものであった。
- インドは、我が国よりも優れるとは言い難いものの、高速増殖炉開発関連の技術を中心として、我が国が着目すべき技術的ポテンシャルをいくつか有している。また、魅力的な炉や開発装置なども保有している。
- インドは研究開発成果をかなり公開しており、研究活動度も成果公開も一般的に思われている以上に進めている。最近では、インドの開発状況を世界に発信する姿勢、更に進めており、国際会議への参加なども積極的である。IAEAのINPROへの積極参加も特徴的である。
- インド国内での、民生開発と軍事開発の間の技術汚染の可能性については慎重に検討が必要である。
- インドの高速増殖炉開発は重要な段階を迎えており（PFBRの建設）、この技術情報は我が国の今後の高速増殖炉開発にとっても有益である。また、周辺基盤技術や再処理技術などでも着目すべきものがある。また、照射設備の利用などの、施設利用による我が国へのメリットの可能性もある。
- 我が国の大学へのインドからの研究者の受け入れは、従来、やや制限されてきたと思われる。一方、大学では基礎研究が主体であるから、基礎研究での留学受け入れは大きな問題にはならないのではないかと考える。
- 大学は、学術研究の場として、インドと交流する場を提供することが可能ではないかと考える。