

# インドに見るアジアの原子力開発

## 原子力新時代の幕開け（後編）

前原子力委員会委員長

日本原子力研究開発機構

藤家 洋一  
佐藤 浩司



前報（三月号）では、昨年一二月のインド訪問を前にして考えたこと、誰と会い何を話したか、インドと如何に向き合うべきかについての考え方を示した。本報（後編）では、インドで何を見、何を感じたか、インドの原子力開発の現状に照らし紹介する。

### 一 インドのエネルギー事情等

#### （一）歴史的背景

一九四七年に英領インドはインドとパキスタンに分離独立し、一九五〇年にはインド憲法が公布されインド共和国が成立した。インドの原子力開発は、独立前の一九四五年度のタータ基礎研究所（ムンバイ）から始まり、独立直後の一九四八年には原子力法を制定して原子力委員会が設立されている。わが国では一九五五年に原子力基本法が制定され、その翌年に原子力委員会が発足しているが、インドの原子力開発の歴史はそれよりも古い。一九五七年一月にはバーバ原子力研究センター（BARC）の前身であるトロンベイ原子力研究所が設立され、同年にはアジアで最初の原子炉であるアスパラ（最大熱出力一〇〇〇キロワット）が運転を開始し、現在も同位体製造、遮蔽実験等に利用されている。

また、一九五七年には国際原子力機関（IAEA）が設立されたが、インドはその創設に貢献した一二か国の一員で、第一回の「原子力の平和利用に関する国際会議」の議長をインドの初代原子力委員長であるホミ・バーバ博士が務めている。このように原子力の平和利用に徹してきたインドであるが、一九七四年及び一九七八年に地下核実験を実施したことにより、その後国際社会からの支援が得られなくなり、現在に至っている。彼らは一九七四年の核実験は、当時世界でも検討されていた大規模な土木工事や地下資源開発等に資するための「平和的核爆発」であり、また一九七八年の核実験は、パキスタン、中国等に囲まれているインドの地政学的な状況下で、その脅威から国の安全保障を維持するために自衛兵器として実施したものであると言っており、その後は自発的な核実験モラトリアムを宣言し維持している。また核不拡散条約（NPT）への未加盟問題についても、NPTの趣旨そのものには賛成するが、その不平等性等が改められない限り今後も加入することはないであろうと言っている。

（二）経済成長に見合うエネルギー源車が停止した際に人々が車の間隙

をぬって道路を横断する光景には、インドのいたるところで遭遇した。まさに「人が何処から湧き出してくる」という表現がふさわしいものであった。インドの人口は一億一九五〇万人（世界人口白書二〇〇六）で、その増大傾向は次第に減少するもの二〇五〇年頃には一五億人を超えて中国を抜き、世界第一位になることが予想されている。しかし、インドの一人当たりの年間電力消費量（二〇〇六年）は約六〇〇キロワット時と、西欧に比べて一桁小さい（図1）。経済成長の進むインドでは電力不足のため、日常的に停電が発生しており、新聞等で計画的な「電力負荷制限」が周知されている。

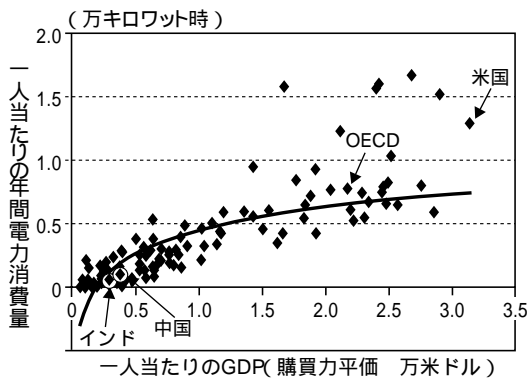


図 1 一人当たりのGDPと、一人当たりの年間電力消費量との相関

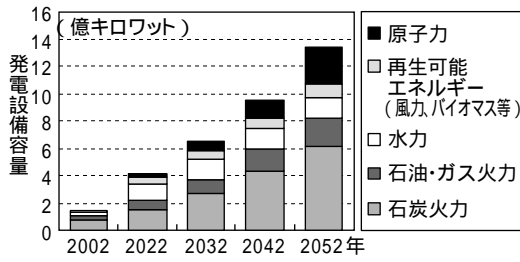


図 2 インドの電力設備容量の増設計画

ここでエネルギー安定供給と環境負荷低減を考えると、原子力発電の大幅な増大が必要であり、さらに国内の資

我々が今回訪問した四都市においては幸い長時間の停電には遭遇しなかつたものの、チェンナイ近郊で滞在したホテルでは三回の瞬時に遭遇した。このような計画停電はインド全土で今後も当面の間続くと聞いている。

一般に一人当たりで換算した国内総生産（GDP）と年間電力消費量とは相関が良いことが知られている。インドの生活水準を先進国並みに向上させるためには、一人当たりの年間電力消費量を今後約五〇年間で八から一〇倍程度増大させる必要があるとのことで、発電設備容量を約一・四億キロワット（二〇〇二年）から、二〇五〇年頃には約一三億キロワット

## 二 インドの原子力開発計画と開発体制

源的制約を考えると、高速増殖炉（FBR）の導入が不可欠となるため、二〇五二年には全発電量の約二〇％に相当する二・七五億キロワットの大半をFBRで賄うことを計画している。

### （1）独自開発とその限界

インドのトリウム資源の埋蔵量は、世界第二（世界のトリウム資源埋蔵量の約二五％）を誇る。その一方、ウラン資源は乏しくかつその品位は良くない。そのためインドの初代原子力委員長バーバ博士は、豊富なトリウム資源を有効活用出来るインド独自のトリウムサイクルの確立を目指す三段階開発計画を策定した。この計画では海外ウランに依存しなくて済む特徴があり、一九五五年にジュネーブで開催された第一回国連「原子力平和利用会議」等で発表している（図 3）。

第一段階 天然ウランを燃料として利用できる重水減速加圧重水冷却炉（PHWR）を建設し、発電するとともに、ウラン238から核分裂性のプルトニウム239を生産する。  
第二段階 PHWR燃料を再処理して回収されるプルトニウムと減損

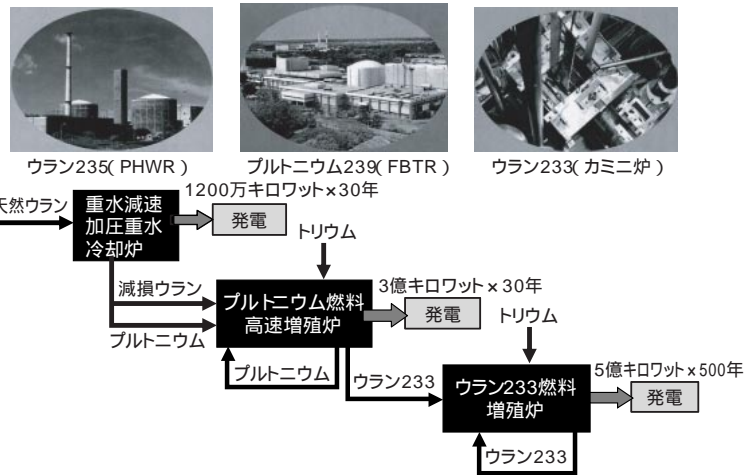


図 3 インドの原子力開発計画（3段階方式）

出典：DAE, "Atomic Energy in India: A Perspective", Sep.2006

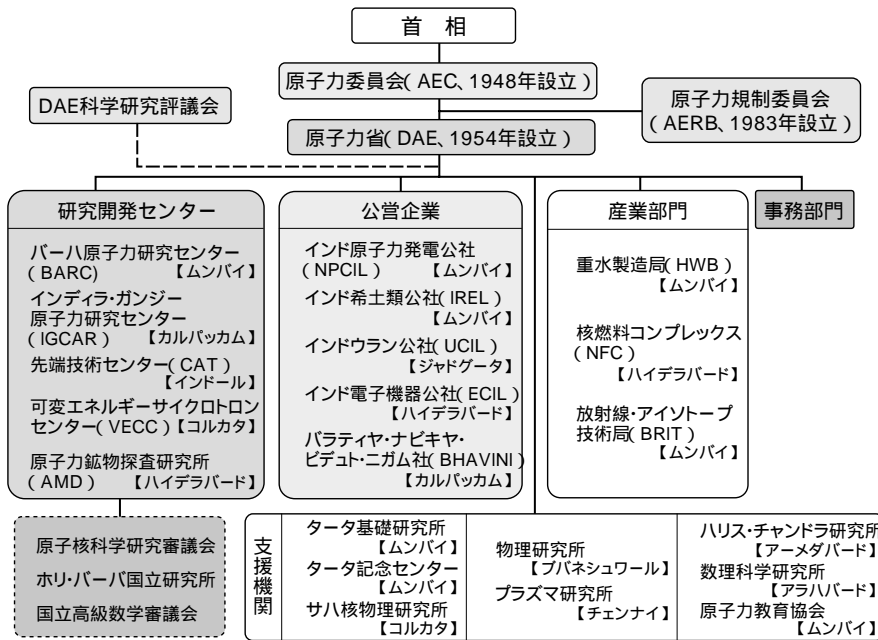
図 3 インドの原子力開発計画（3段階方式）

する（注 ウラン233の中性子吸収当りに核分裂によつて発生する中性子数（ $\eta$ ）は、熱中性子領域で二・二八であり、共鳴吸収領域でもあまり減少しないため、熱中性子炉で増殖できる可能性がある）。

インドはこの計画を一貫して進めてきており、現在は第二段階にある。

しかし、一九七四年の核実験以降、国際協力が得られなくなつたため、インド独自で開発を進めてきたPHWRの標準炉の電気出力は二二万キロワットと比較的小さい。やっと最近になって五

建設され、今後は七〇万キロワットへの大型化を考えているが、それでも最新の軽水炉の出力に比べて半分程度である。電力不足を解消し経済発展に必要なエネルギー供給保障と環境保全との両立を目指して原子力の積極的な導入を図るためには、海外からの大型軽水炉を濃縮ウランとともに輸入する必要があると考えており、既にロシアから輸入した一〇〇万キロワットの加圧水型軽水炉（VVER）二基を建設中で、今年一月のプーチン



出典：DAE, "Atomic Energy in India: A Perspective", Sep.2006

図 4 インドの原子力開発体制

大統領の訪印時にさらに四基導入することが合意されている。

(2) 開発体制

インドの原子力委員会は首相直轄で、その下に原子力規制委員会と原子力省があり、原子力省の傘下には、五つの研究開発センター、五つの公営企業、三つの産業部門、事務部門がある(図 4)。

また原子力省は、原子力とその応用分野及び数学における垣根を越えた研究を促進し予算を手当するたに、二つの審議会(原子核科学研究審議会、国立高級数学審議会)を持つている。さらに原子力省は、基礎科学、天文学、天体物理学、がん研究、教育等を行う七つの研究所と、原子力省職員の子弟を教育する協会等を支援している。

今回のインド訪問では、研究開発センターのBARC及びインディラ・ガンジー原子力研究センター(NPCIL)及びバラティヤ・ナビキヤ・ピデユト・ニガム社(BHAVINI)並びに公営企業のインド原子力発電公社(NPCIL)及びバラティヤ・ナビキヤ・ピデユト・ニガム社(BHAVINI)を訪問したので、以下ではこれらの機関で実施されて



いる原子力開発の現状について紹介する。

三 インド原子力発電公社を中心とした第一段階の原子力開発

インドで初めての原子力発電所は、米国ゼネラル・エレクトリック(GE)社よりタービン方式で二基導入された沸騰水型軽水炉(BWR)一九六九年に運転開始)であった。しかし、その後は自国に商業レベルのウラン濃縮施設を持っていないため、天然ウランを燃料として使用でき、天然ウランを燃料として使用できる開発を積極的に推進してきた。カナダ型重水炉(CANDU)二基の建設(一基はカナダ製、後の一基は一九七四年のインドの核実験により

発電所名(場所)	運転中	建設中	計画中
タラプール	BWR 16万kW×2基 PHWR 54万kW×2基	-	230万kW
ラジャスタン	CANDU 10万kW×1基 CANDU 20万kW×1基 PHWR 22万kW×2基	PHWR 22万kW×2基	PHWR 70万kW×2基
マドラス(カルパッカム)	PHWR 22万kW×2基	FBR 50万kW×1基	FBR 50万kW×2基
ナローラ	PHWR 22万kW×2基	-	140万kW
カクラパー	PHWR 22万kW×2基	-	PHWR 70万kW×2基
カイガ	PHWR 22万kW×2基	PHWR 22万kW×2基	140万kW
クダンクラム	-	VVER 100万kW×2基	VVER 100万kW×4基
ジャイタプール	-	-	600 - 800万kW
ピマプール	-	-	280万kW
コヴァーダ	-	-	400万kW
合計	390万kW	338万kW	2570 - 2770万kW

図 5 運転中、建設中、計画中の原子力発電所

カナダの協力が得られなくなつたため(国産で開発)後は、国産技術でPHWRを建設している。現在NPCILで運転中の原子力発電所は合計一六基(総電気出力三九〇万キロワット(全発電量の三・一%)で、平均約九〇%の高稼働率を達成している。経済性向上と電力需要への早期対応を図るため建設期間の短縮化や長期運転に努めている(図 5)。

また、現在建設中と計画中を合わせて二〇二〇年までには総発電設備

規模二〇〇万キロワットを目標としていたが、今後国際的原子力協力の実現により大型軽水炉を濃縮ウラン付で海外から導入できることを期待して、二〇二〇年の開発目標をその倍の四〇〇万キロワットに見直している。

運転員の教育訓練は、NPCIEL各所、BARC、世界原子力発電事業者協会(WANO)のトレーニングセンターを利用して行うとともに、多数の発電炉を同時期に作ることで職場内訓練(OJT)を行っている。なお、米国の当初の約束を守るために、米国製BWR二基から発生した使用済燃料の再処理(プルトニウム回収)は行っていない。

#### 四 インディラ・ガンジー原子力研究センター等を中心とした第二段階の原子力開発

カルパツカムにあるIGCARでは、ナトリウム冷却FBRとその燃料サイクルの研究開発を行っている。

一九八五年から定格熱出力四万キロワットの高速増殖実験炉(FBTR、ループ型)を運転しており、その後蒸気発生器とタービン等を設置して一九九七年から送電も行っている。蒸気発生器とタービン、混合ブルトニウム・ウラン炭化物燃料を用いている以外はフランスのラプソディと

同じ設計であり、炭化物燃料の最高燃焼度は一五・五万メガワット/トンを達成している。ナトリウムについてもIGCARの施設内で自ら精製して使っている。なお、設計当初は混合酸化物(MOX)燃料を用いる予定だったが、小型炉心用の濃縮ウランが手に入らなくなったため高ブルトニウム富化度が可能な炭化物燃料を採用した。二〇〇二年に一次ナトリウム系のバルブから約七五キログラムのナトリウム漏洩が発生したが三か月で復帰、その他の大きなトラブルは経験していない。現在、高速増殖原型炉(PFBR)用MOX燃料の小規模(三七ピン)集合体を照射中である。また照射能力の向上を図るとともにMOX燃料の製造・照射実績を得るために、燃料集合体数を四二体から八四体へ増やし、外側炉心をMOX燃料とするハイブリッド化を進めており、今後、金属燃料の照射も計画している。

IGCARの敷地内では、FBRを建設・運転するために二〇〇三年一〇月に設立された新会社(BHAVINI)によってPFBR(五〇万キロワット、タンク型、MOX燃料、図6)が二〇〇四年一〇月から建設中であり、二〇〇六年一二月時点の工事進捗率は二三%で、二〇一〇年

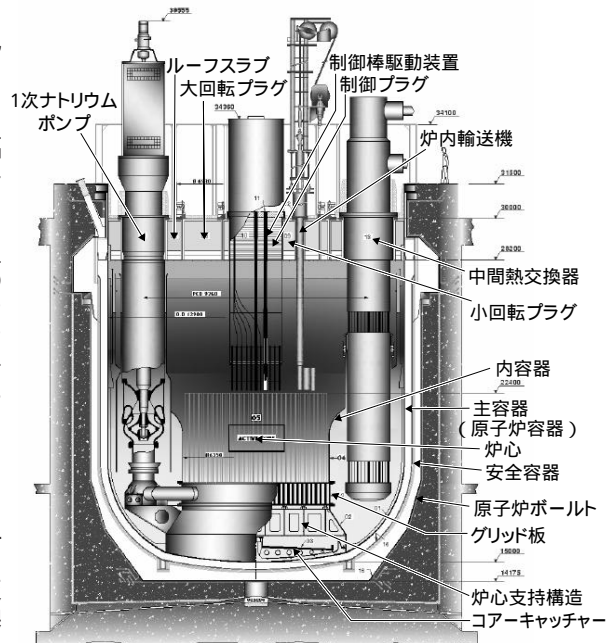


図 6 高速増殖原型炉(PFBR)の原子炉断面図

厚さ一・二メートルの基礎コンクリートの強度は期待しないものとして、その上に新たに基礎コンクリートを打設したとすることで、再開に四か月半を要したとのことであった。

九月に初臨界を、二〇一一年三月には商業運転を開始したいとのことであった。PFBRの特長として、ナトリウム冷却系の二ループ化、使用材料の削減等がある。安全容器、原子炉容器(直径約一二・九メートル)等はサイト近傍に設置された機器組立工場で作成中で、組立てられた機器はレールで現場に運ばれる。原材料以外は全てインド製で、特に組み立て精度に気を使っていた。なお、原子炉容器等を設置する基礎コンクリートの施工開始直後の二〇〇四年一月にインドネシア沖地震による津波の被害を受けたため、その上部構造物は全て撤去するとともに、既設の

料に交換を想定した炉心設計」を二〇一二年に建設を開始し、二〇二〇年までにツインプラントで二セット建設する予定で、その一セットはカルパツカムに、他の一セットの建設予定地はまだ決まっていない。その後は、国内の電力需要の急上昇に対応するために、MOX燃料より高増殖で炉外燃料冷却時間を短縮し、システム倍増時間を短くできると期待される金属燃料を用いた一〇〇万キロワットの商業炉を建設したいと考えている。その際、増殖率向上を図るために金属燃料中のジルコニウムの含有率を米国等で実績のある一〇%から六%程度に下げる設計検討も行って

おり、今後安全性等のデータの拡充が不可欠と考えられる。

PFBRの建設期間は七年、建設費（エスカレーション無しとした場合）は六・二億ドル（約七五〇億円）で、また運転期間四〇年、燃焼度一〇万<sup>メガワット</sup>日/トン、稼働率六二・八%とした場合の発電原価は三・二ニール<sup>ピロキワット</sup>時（一ール<sup>ピロキワット</sup>二・七<sup>ピロキワット</sup>時）換算で約八・七円/<sup>キワット</sup>時である。しかしその標準化した後継炉では、各々五年、五・四億ドル、六〇年、二〇万<sup>メガワット</sup>日/トン、八〇%に向上させることにより、発電原価を約五円/<sup>キワット</sup>時に低減し、さらに金属燃料を用いた一〇〇万<sup>キワット</sup>では約四・三円/<sup>キワット</sup>時程度となると試算している。この発電原価は、円/ル<sup>ピロ</sup>の換算レートの不確かさを考えると、日本のFBRサイクルにおける経済性の開発目標値（四円/<sup>キワット</sup>時）に近い。なお建設費が日本に比べて半分以下なのは、インドの人工費が日本より一桁程度安いこと等が大きく影響していると推察される。

R燃料の再処理・燃料製造を行い廃棄物を処理する一体型のFBR燃料サイクル施設（FRFCF）を、二〇一二年までに建設する計画がある。さらに、金属燃料の乾式処理の研究も約一〇年前から行っており、工学規模の試験施設も建設中である。二〇二〇年には、FBRサイクル技術の世界のリーダーになるとの意気込みで開発を進めている。

### 五 バーバ原子力研究センターを中心とした第三段階の原子力開発

BARCは、ムンバイ近郊のトリンベイに設置されたインド最大の研究機関で、本部のあるムンバイ以外にもインド各所にBARCの研究施設がある。BARCでは、原子炉物理、原子炉工学等を含めた各種新型炉と関連する燃料サイクルの開発を行うとともに、原子力の熱利用技術、放射線育種、食品照射、核医学診断、放射性同位体の医療・農業・産業分野への応用、ビーム技術（加速器・レーザ・プラズマ）など、放射線の利用を含め原子力の基礎から応用までの広範囲にわたる先進的な研究開発を行っている。

また、原子力開発のための人材を育成するトレーニングコースも完備しており、毎年約一〇〇人、これま

でに約七〇〇人を超える原子力技術者を輩出しており、バナージー所長やカコダカル原子力委員長も受講している。インドでは、大学を卒業した後ここで一年間の教育訓練を受けないとプルトリウム等の核物質を扱うことは出来ないとのことで、日本のような技術先進国で何故ジェーシーオー（JCO）臨界事故が起きたのか不思議がられた。

BARCには、七つの研究炉が設置されていたが、その内四研究炉は既に廃止されており、現在運転されているのはアプサラ、サイラス（熱出力四万<sup>キワット</sup>）及びドルーバ（熱出力一〇万<sup>キワット</sup>）の三つの研究炉で、同位体製造や遮蔽実験、炉心技術開発等に使われている。また、インドの原子力開発計画の第三段階で使うAHRWの開発を進めており、同一燃料集合体内にウラン<sup>233</sup>トリウム<sup>239</sup>MOX燃料ピンと、プルトリウム<sup>239</sup>トリウム<sup>233</sup>燃料ピンとを配列した電気出力三〇万<sup>キワット</sup>の重水減速・軽水沸騰冷却炉は、原子力規制委員会による安全審査前の設計安全評価（プレヒア）中である（図7）。なおIGCARでは、ウラン<sup>233</sup>燃料を用いたカミニ研究炉（熱出力三〇<sup>キワット</sup>）が一九九六年から運転されている。さらに、トリウム燃料

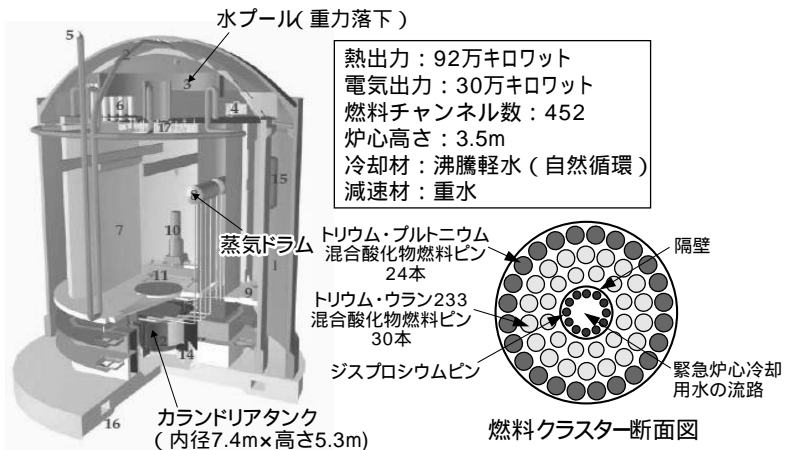


図 7 新型重水炉 (AHWR)

利用のための長期的なロードマップとして、遠隔地での発電や一〇〇〇の高温熱源を利用した水素製造等を目的とした小型高温炉（CHTR、酸化ベリリウム減速・鉛ピスマス冷却、トリウム/ウラン<sup>233</sup>炭化物被覆粒子燃料）や、加速器駆動の陽電子ビームを液体鉛ピスマス合金等のターゲットに照射し、核破砕時に発生する多量の中性子を用いて、ト

リウム燃料からウラン<sup>233</sup>を生産したり、高レベル廃棄物の環境負荷低減のために長寿命のマイナーアクチノイド核種や核分裂生成物を短寿命化するための加速器駆動未臨界炉の研究も行っている。

燃料サイクルについては、BARCではFBR用の混合炭化物燃料や試験用MOX燃料を製造している。MOX燃料は、ムンバイから約一二〇キロ北のタラプールにあるBARCの新型燃料製造施設(AFF F)で製造しており、PFBR用の初期の数炉心分の燃料もここで製造する予定である。また、ウランとトリウムの分離施設も運転中である。さらに、毎時一五位の処理能力を持つ誘導加熱方式の高レベル廃棄物処理施設(ガラス固化施設)も二〇〇二年から運転を開始しており、処理されたガラス固化体を地層処分前に冷却保管するサイトも三か所決定済みとのことであった。

## 六 原子力施設の軍民分離計画

二〇〇五年七月、米国はそれまでのインドに対する核不拡散政策を転換し、民生用原子力協力を行うことに基本的に合意した。それに基づき、二〇〇六年三月にインドの原子力施設の軍民分離に関する合意が締

結された。その主な合意内容は、以下の通りである。

現在運転中及び建設中の二二基の熱中性子炉のうち一四基を、二〇〇六―二〇一四年の間にIAEAの保障措置下に移す。

(PFBRとFBRは研究開発施設であり、その技術の成熟までには時間がかかるため)これらの施設には保障措置を適用しない。将来の全ての民生用熱中性子炉及び民生用増殖炉を保障措置下に置く。但し、どの炉を民生用とするかはインド政府が独自に判断する。再処理、濃縮ならびに戦略プログラムに関連する燃料サイクル施設は、保障措置の適用範囲外とする。また、保障措置下に置く原子炉に対する燃料供給に関し、米国による保障措置枠組の構築、米印協定への供給保障の明記、インド・IAEA間交渉への米国の協力、燃料戦略備蓄体制構築への米国の支援、米国による原子力供給国グループ(NSG)との燃料供給再開の検討、を約束する。NPTに未加盟のインドとの原子力協力を可能とするためには、米国原子力法を改正し、インドを例外扱いとする必要があるが、そのための法案も二〇〇六年一二月にブッシュ

大統領の署名により成立した。米印原子力協力協定の正式締結には、NSGの了解や、IAEAとのインドに特化した保障措置協定の締結等が必要であり、それに向けて現在交渉が進められている。

## 七 国際協力への期待

### (1) 世界に対する期待

現在でもニューデリー等の都市部では大気汚染が深刻であるが、インドでは急速な電力需要の伸びに対応するために電力設備の大幅な増大を計画しており、その大部分は火力発電等に依存せざるを得ない状況が続き、地球温暖化やエネルギーの安定供給の観点から問題があると考えている。もし大型の軽水炉を濃縮ウランとともに輸入できれば、二〇二〇年ごろの原子力発電量は(自国内で賄う場合の)約二〇〇〇万キロワットに対して約二倍の約四〇〇〇万キロワットを達成可能であろうと、今後の国際協力を切望している。

### (2) 日本に対する期待

BARC及びIGCARの両センターにおいて、何から協力をスタートさせるかで向こうが強く望んだのは、安全の議論から始めませんかと言ったことであった。安全はナショナルというよりもインターナショナル

な問題なので、今はお互い日印原子力協定が無くては始められるでしょう。その中で議論を深めていけば、色々議論を拡大することが可能である。また、BARCからは放射線に関連した研究の協力もやりたいとの要望もあった。さらにIGCARからは特に、FBRの安全性について協力を期待したいとの要望が出された。なお、トリウムサイクル等のアカデミアレベルの交流は既に行われており、大学での交流としては、日本学術振興会の留学制度がある。

また、インドは既にWANO、国際熱核融合実験炉プロジェクト(ITER)、IAEAの革新的原子炉及び燃料サイクルプロジェクト(INPRO)や高速炉技術ワーキンググループ(TWGR)に参画しているが、第四世代原子力システム国際フォーラム(GIF)への参加も希望している。

インドのFBRサイクル技術の開発はかなり進んでおり、日本だけではなくGIF参加国にとっても学ばべきところが多くあり、また安全性の考え方などは国際的なコンセンサス作りが不可欠であるので、日本としてもインドのGIFへの参加を支援してもよいのではないかと考えられる。