



目次

1. インドの米国との原子力平和利用協力協定締結後の原子力開発の進捗状況

1. インドの米国との原子力平和利用協力協定締結後の原子力開発の進捗状況

2008年10月10日の米印原子力平和利用協力協定発効によって、インドは、1974年5月18日の原爆実験を契機に30年以上にわたった世界の原子力市場からの断絶状態が終了し、ロシア、フランス、米国からの原子炉の輸入、フランス、ロシアからの天然ウランの輸入など積極的に海外企業との交渉を進めている。¹⁾一方では、2009年9月16日、IAEAの会議に出席したインド原子力委員会委員長兼原子力省長官の Anil Kakodkar は、自主技術で開発した第四世代の先進型重水炉 (Advanced Heavy Water Reactor: AHWR、インドが目指しているトリウム燃料サイクルの中でトリウムから転換した U233 と Pu の混合燃料を使用して発電を行う) の低濃縮ウラン使用の改良型を発表し、海外への輸出を表明している。²⁾

2009年9月29日、ニューデリーで開催された原子力平和利用に関する国際会議の開会式で、インドのマモハン・シン首相は、インドが計画している3段階の原子力開発プログラム(インドが目指すトリウム燃料サイクル)がうまくいけば2050年までに原子力発電は470GWe(全電力の約40%、2008年末の世界の原子力発電設備容量は371GWe)に達する可能性があるとして述べている。^{3),4)}

以下に、最近のインドの原子力開発の進捗状況を示す。

(1) 原子力発電所建設計画

インド政府は、最近、8 サイトに 15 基の原子炉建設を承認したが、これを受けて、2009 年 10 月 8 日、インドで唯一の、国営原子力発電株式会社である NPCIL (Nuclear Power Corporation of India Ltd.) の会長の S.K. Jain は、2032 年までに目標の 63GW を達成できるだろうと述べた。⁵⁾

これら 8 サイトは、既に原子炉が設置または建設中のサイトである Gujarat (グジャラート) 州の Kakrapar (カクラパール) と Tamil Nadu (タミル・ナードゥ) 州の Kudankulam (クダンクラム) 以外に、新たに Haryana (ハリヤーナー) 州の Kumharia (クムハリヤ)、Gujarat (グジャラート州) の Chchaya (チュチャヤ)、Andhra Pradesh (アーンドラ・プラデーシュ) 州の Kovvada (コバダ)、West Bengal (西ベンガル) 州の Haripur (ハリプール)、Maharashtra (マハラシュトラ) 州の Jaitapur (ジャイタプール) などが追加され、将来建設される原子炉の発電容量は 50GWe と言われている。⁵⁾

これら 8 サイトの中には、海外から導入する軽水炉のための 4 サイトが含まれていて、Maharashtra (マハラシュトラ) 州の Jaitapur (ジャイタプール) にはフランスの AREVA の EPR (1650MWe) を 1 基、West Bengal (西ベンガル) 州の Haripur (ハリプール) にはロシアの VVER (1200MWe) を 2 基、Gujarat (グジャラート州) の Mithi Viridi (Chayamithi Viridi との報道もある) と Andhra Pradesh (アーンドラ・プラデーシュ) 州の Kovvada (コバダ) に米国の GE-Hitachi の ABWR と Westinghouse (東芝の子会社) の AP-1000 をどちらかのサイトに 1 基が建設されることである。^{4),6)}

2009 年 12 月 1 日時点で設置されている原子炉は 18 基、4340MWe (稼働中のものは 17 基、4240MWe) で、建設中のものは 7 基、4340MWe であり、2010 年末までには 2440MWe が運開する予定である。また、報道等で建設計画が発表された建設準備中及び計画中ものは合計で 24 基、27100MWe である。これらの中には、まだ計画が具体化していない米国の GE-Hitachi の ABWR と Westinghouse の AP-1000 の建設計画は含まれていない。NPCIL は GE-Hitachi と Westinghouse とは、各々 2009 年 5 月 23 日と 2009 年 5 月 28 日に原子炉建設のため話し合いを始める覚書を締結しているが、インドにおいて原子力損害賠償法が制定されていない問題と、インドが米国に求めているインド国内での米国製原子炉から発生した使用済み燃料等の再処理及び分離抽出したプルトニウム等の利用に関する問題についての調整が決着しておらず、フランスやロシアに比べ建設計画が大幅に遅れている。この問題については、2009 年 11 月 23 日のシン首相の米国訪問時に最終決着を目指していたが合意には至らなかった。しかし、2009 年 11 月 29 日、インドのシン首相の安全保障特別補佐官は最終調整の段階に達したと述べている。⁷⁾

表 1 と図 1 に、インドの原子力発電所の現状と今後の建設計画を示した。

表1 インドの原子力発電施設の現状と建設計画(2009年12月1日時点)

立地場所	炉型	炉名	出力 (MWe)	運転開始年等
Narora Uttar Pradesh 州	PHWR	1号 2号	220 220	1991年 1992年
Rawatbhata Rajasthan 州	PHWR	1号 2号 3号 4号 5号 6号 7号 8号	100 200 220 220 220 220 700 700	1973年、2004年より停止中 1981年 2000年 2000年 2009年11月24日運開 ¹¹⁾ 建設中 2010年2月運開予定 ¹²⁾ 建設中 2016~2017年までに運 開予定 ^{8),15)}
Kakrapar Gujarat 州	PHWR	1号 2号 3号 4号	220 220 700 700	1993年 1995年 建設準備中 ⁸⁾ 建設準備中 ⁸⁾
Tarapur Maharashtra 州	BWR (GE製) PHWR	1号 2号 3号 4号	160 160 540 540	1969年(GE製造) 1969年(GE製造) 2006年 2005年
Jaitapur Maharashtra 州	LWR (AREVA のEPR)	1号 2~6 号	1650 8250 (1650×5)	建設準備中 計画中 ⁶⁾
Kaiga Karnataka 州	PHWR	1号 2号 3号 4号 5号 6号	220 220 220 220 700 700	2000年 2000年 2007年 建設中 2009年12月運開予定 ⁶⁾ 計画中 ¹⁶⁾ 計画中 ¹⁶⁾
Kudankulam Tamil Nadu 州	LWR (ロシア VVER)	1号 2号 3号 4号 5号 6号	1000 1000 1200 1200 1200 1200	建設中 2009年初旬運開予定 ¹²⁾ 建設中 2009年中旬運開予定 ¹²⁾ 2010年建設開始予定 ¹³⁾ 2010年建設開始予定 ¹³⁾ 計画中 ¹³⁾ 計画中 ¹³⁾
Kalpakkam Tamil Nadu 州	PHWR FBR	1号 2号 1号 2号 3号	220 220 500 500 500	1984年 1986年 建設中 2011年運開予定 ⁶⁾ 計画中 ⁶⁾ 計画中 ⁶⁾
Haripur West Bengal 州	LWR (ロシア VVER)	1~6 号	7200 (1200×6)	計画中 ¹⁴⁾
Bargi,Mandla Madhya Pradesh 州	PHWR	1号 2号	700 700	計画中 ¹⁷⁾ 計画中 ¹⁷⁾



図 1 インドの原子力発電施設等のサイト(2009年12月1日時点)

核燃料については、Andhra Pradesh (アンドーラ・プラデーシュ) 州の Hyderabad (ハイデラバード) で国営会社の Nuclear Fuel Complex (NFC) が製造を行っているが、NPCIL が建設準備中の 4 基の 700MWe の PHWR (表 1 参照) のために 500t/y (700MWe、1 基分の取り換え燃料は 125t) の核燃料製造工場を Rajasthan (ラジャスタン) 州の Rawatbhata (ラワタバタ) に建設予定で、さらに計画中の 700MWe の PHWR、4 基分の 500t/y の核燃料製造工場を建設する計画である。また、海外から導入する LWR 用の燃料については、100 億ルピー (約 2.2 憶ドル) で大規模な核燃料製造工場を造る計画を検討中で、米国、フランス及びロシアの企業に対して合併事業の提案を行っている。^{6),8)}

(2) 核燃料サイクルと原子力発電長期計画^{9),10)}

インドでは、石油及び天然ガス資源が乏しく、石炭は世界第 3 位の生産国であるが電力需要の増大に対応できず世界第 4 位の輸入国でもある。このため、国内の豊富なトリウム資源を利用した核燃料サイクル技術の確立を国策の優先事項としており、原子力開発を始めた時よりこの戦略はぶれることがなく研究開発が行われている。

2008 年 7 月 4 日、インド科学アカデミーで行われたインド原子力委員会委員長兼原子力省長官の Anil Kakodkar の公開講演の資料からインドにおける核燃料サイクルと原子力発電長期計画について以下に紹介する。

① 核燃料サイクル

インドの原子力戦略は、国内のウラン資源 61,000tU (Uranium2007 によれば、発見資源量は 24000tU、未発見資源量は 67,900tU) と 225,000t を超えるトリウム資源 (2009 年 11 月 26 日、インド原子力省発表では 182 万t¹⁸⁾) を利用する核燃料サイクルで、3 段階からなっている。

第一段階は、天然ウラン燃料を用いた PHWR による発電と U238 の Pu239 への転換による核分裂性物質の生産である。インドが PHWR を選んだ理由は、同じ天然ウランの使用量に対して、重水炉は軽水炉に比べて中性子経済が良く (重水は水 (軽水) より中性子吸収が少ない) 軽水炉よりプルトニウムを多く生産できただけでなく多くの出力を得ることができるからである。

第二段階は、第一段階で生産したプルトニウムとウランの混合燃料 (炉心のコア領域に装荷) を用いた FBR (ナトリウム冷却高速増殖炉) による発電と Th232 の U233 への転換及び U238 の Pu239 への転換による核分裂性物質の生産 (炉心の周囲のブランケット領域にウランとトリウムの混合燃料を装荷) であり、燃焼した以上の核分裂性物質を生産する。インドの計画では、当初は技術的に確立しているプルトニウムとウランの混合酸化物燃料 (MOX 燃料) を用い、ブランケット領域にはウランだけでトリウムは装荷しない。これは、トリウムを装荷することで核分裂性物質の増殖率が低

下し FBR の発電設備拡大の妨げになるからである。次の段階としては、増殖率の優れた金属燃料を導入する。金属燃料を導入してから約 30 年後(2040 年代)で、FBR が約 200GWe に達した段階でブランケット領域にウランとトリウムの混合燃料の装荷を開始し、U233 の生産を開始する。

第三段階は、第二段階で生産した U233 とトリウムを燃料として、AHWR で発電しながら U233 を生産する最終段階に達し、トリウム燃料サイクルに入ることになる。

現在の状況は、PHWR の 700MWe の大型炉の 8 基の建設準備中で建設コストは 1700 ドル/kW と軽水炉の半分程度で発電コストは 6 セント/kWh、第二段階の FBR については 500MWe の原型炉を Tamil Nadu 州の Kalpakkam に建設中で 2011 年に運開を目指している、建設コストは 69840 ルピー/kW(約 1460ドル/kW)、発電コストは 3.22 ルピー/kWh(約 6.7 セント/kWh)と経済性もあり、さらに設計の改良によって経済性を向上させた 4 基の 500MW 機を建設準備中である。また、第 3 段階の AHWR、300MWe については設計が完了し、建設を準備中である。

AHWR については、インドの原子炉輸出戦略として、2009 年 9 月 16 日、IAEA の会議に出席したインド原子力委員会委員長兼原子力省長官の Anil Kakodkar は AHWR の改良型の AHWR300-LEU についての発表を行っている。AHWR は、トリウム燃料サイクルの初期には U233 とプルトニウムにトリウムを加えた燃料を使用するが、AHWR300-LEU では平均濃度で U235 が 19.75%の濃縮ウランとトリウムの混合酸化物燃料を使用し、平均の核分裂性物質の濃度は 4.21%である。

特徴は、AHWR が備えている第 4 世代の安全性として受動的安全設計が施されていて、緊急事態においても運転員は 3 日間の対応余裕があり、いかなる環境下でも敷地境界を越える事故時の緊急計画を策定する必要がないとしている。このすぐれた安全性は、人口密度の高い都市近郊への立地を目指しているためである。また、この燃料は、軽水炉に比べてプルトニウムの生成が少なく(U238 より Th232 のほうが中性子吸収率が高いため)、生成するプルトニウムには Pu238 の割合が 3 倍多く含まれていて取り扱いが困難で核拡散抵抗性が高い。さらには、Th232 が転換して生成した U233 による燃焼で出力の 39%を得ることができる。小型炉市場での新たな市場を開拓できる可能性を持っていると思われる。

再処理施設は、原子炉に近接して設置されていて、PHWR の使用済み燃料の再処理のために Trombay、Trapur、Kalpakkam にあり、さらに FBR 原型炉の使用済み燃料再処理のための施設の建設が Kalpakkam で 2008 年に開始されている。

② 原子力発電長期計画

インドの 2050 年における必要発電設備容量は約 1300GWe と推定されるが、石

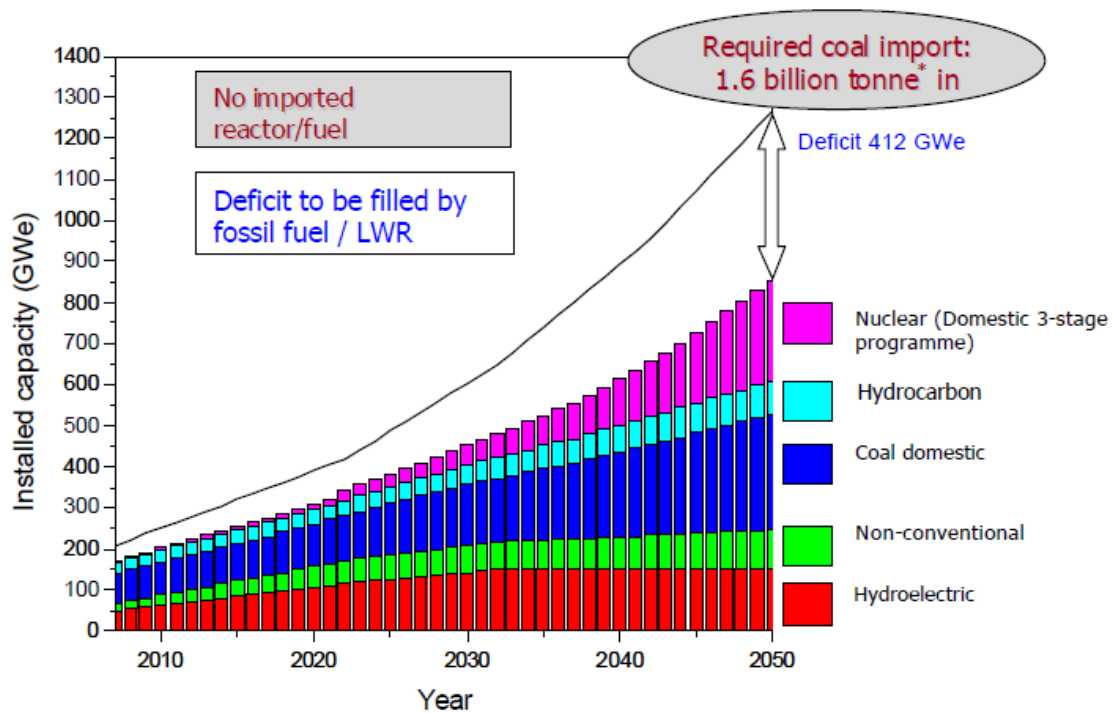


図2 インドの必要発電設備容量と供給能力の長期予測⁹⁾

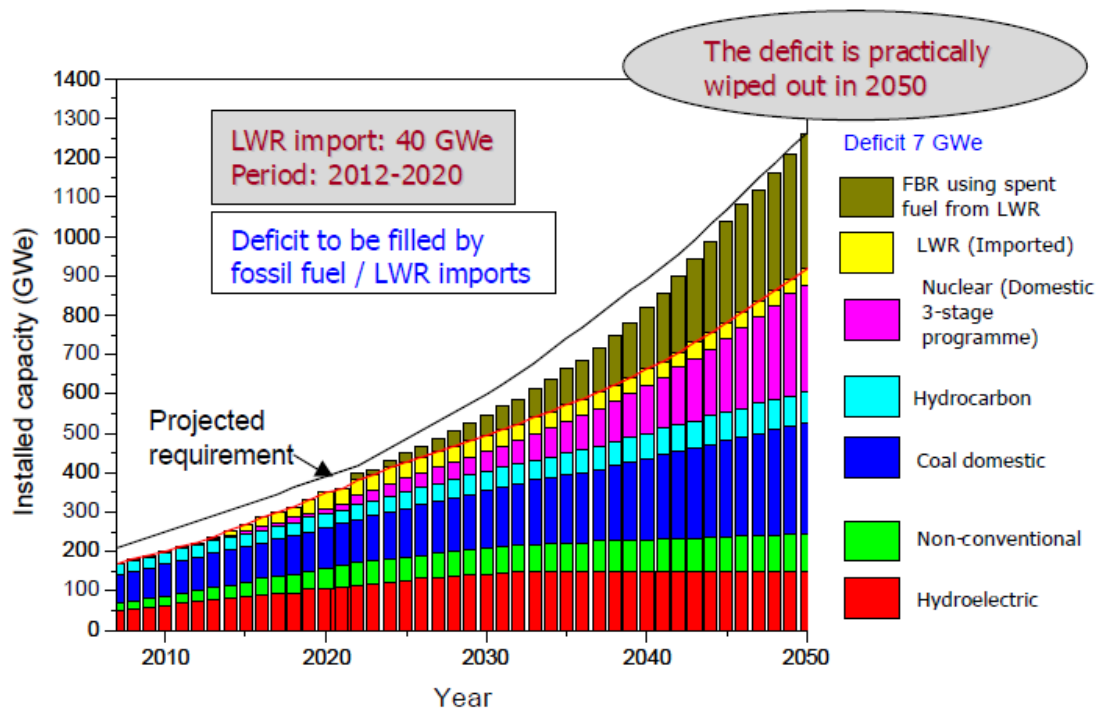


図3 海外からのLWR導入とFBRの展開による発電容量の予測⁹⁾

炭火力の割合を抑え、上記の国産技術による 3 段階の核燃料サイクルを導入しても 412GWe の不足が生じ、不足を賄うためには 16 億トンの石炭を輸入して石炭火力発電所を増設する必要があるとの評価結果を示している。(図 2 参照)

この不足分を原子力で補うためには、2012 年から 2020 年にかけて海外より LWR 及びウラン燃料を導入し、使用済み燃料を再処理して抽出したプルトニウムを燃料にした FBR の導入が必要と結論している。(図 3 参照)

近年の海外からの LWR の早急な導入スケジュールはこれらの評価解析に基づいて行われていると推測される。

参考資料

- 1) “米印原子力平和利用協力協定の締結とインドの原子力開発計画”，原子力海外ニューズピックス 2008 年第 1 号，日本原子力研究開発機構，2008 年 11 月 17 日
<http://www.jaea.go.jp/03/senryaku/topics/t08-1.pdf>
- 2) “Thorium-fuelled exports coming from India”，WNA, September 17, 2009
http://www.world-nuclear-news.org/NP_Thorium_exports_coming_from_India_1709091.html
- 3) “Think big, India”，WNA, September 29, 2009
http://www.world-nuclear-news.org/NP_Think_big_India_2909092.html?jmid=13534&j=239362036&utm_source=JangoMail&utm_medium=Email&utm_campaign=WNN+Daily+29+September+2009+%28239362036%29&utm_content=suto%2Eosamu%40jaea%2Ego%2Ejp
- 4) “India's nuclear drive sparks safety fears”，Asia Times Online, October 27, 2009
http://www.atimes.com/atimes/South_Asia/KJ27Df02.html
- 5) “India's Nuclear Power Corp targets 63,000 MW by 2032”，IANS(Indo Asian News Service.), October 8, 2009
<http://www.aol.in/news-story/indias-nuclear-power-corp-targets-63000-mw-by-2032/616568>

- 6) “Nuclear Power in India”, WNA, November, 2009
<http://www.world-nuclear.org/info/inf53.html>
- 7) “US, India inch 'closer to nuclear deal””, AFP, November 29, 2009
[http://www.google.com/hostednews/afp/article/ALeqM5ilMrGQJmRisRm
mrY3BuC50VPQFAg](http://www.google.com/hostednews/afp/article/ALeqM5ilMrGQJmRisRm
mrY3BuC50VPQFAg)
- 8) “NFC to step up production”, The Hindu, October 13, 2009
<http://beta.thehindu.com/business/article33126.ece>
- 9) “Evolving Indian Nuclear Programme—Rationale and perspective”, Anil Kakodkar, Atomic Energy Commission, India, Public lecture at Indian Academy of Science, Bangalore, July 4, 2008
<http://www.dae.gov.in/lecture/paperiasc.pdf>
- 10) AHWR300-LEU-Advanced Heavy Water Reactor with LEU-Th MOX Fuel-, Bhabha Atomic Research Centre, Department of Atomic Energy, Mumbai, India
<http://www.dae.gov.in/gc/ahwr-leu-broc.pd>
- 11) “ Fifth nuclear reactor commissioned in Rajasthan”, The Hindu, November 24 , 2009
<http://beta.thehindu.com/news/national/article54132.ece>
- 12) “Russian deputy PM reviews Kudankulam nuclear project”, IANS, November 11, 2009
[http://www.samaylive.com/news/russian-deputy-pm-reviews-kudankula
m-nuclear-project/667041.html](http://www.samaylive.com/news/russian-deputy-pm-reviews-kudankula
m-nuclear-project/667041.html)
- 13) “Indian law change essential for nuclear growth”, WNA, November 12, 2009
[http://www.world-nuclear-news.org/NP-Indian law change essential fo
r nuclear growth-1211097.html](http://www.world-nuclear-news.org/NP-Indian law change essential fo
r nuclear growth-1211097.html)
- 14) “No nuclear power plant at Haripur as locals oppose”, Economic Times, November 16, 2009

<http://economictimes.indiatimes.com/news/news-by-industry/energy/power/No-nuclear-power-plant-at-Haripur-as-locals-oppose/articleshow/5237230.cms>

15) “Planting of Atomic Energy Projects”, Department of Atomic Energy, November 26, 2009

<http://pib.nic.in/release/release.asp?relid=54671>

16) “NPC approves Kaiga Nuclear Power Project”, Bangalore, November 27, 2009

<http://mangalorean.com/news.php?newstype=broadcast&broadcastid=157663>

17) “Nuclear Power Stations in States”, Department of Atomic Energy, November 26, 2009

<http://pib.nic.in/release/release.asp?relid=54670>

18) “Nuclear Energy from Sea Sand”, Department of Atomic Energy, November 26, 2009

<http://pib.nic.in/release/release.asp?relid=54669>