

インドの原子力開発の動向について

平成27年6月18日

佐藤 浩司

高速炉研究開発部門
日本原子力研究開発機構

1. インドの原子力開発の歴史とエネルギー事情等
2. 三段階の原子力開発計画と開発体制
3. 原子炉と関連サイクルの開発の現状と今後の計画
4. まとめ

1945年：タータ基礎研究所（ムンバイ）の設立

1948年：原子力法を制定、原子力委員会が設立

(日本：原子力基本法の制定(1955年)、原子力委員会の発足(1956年))

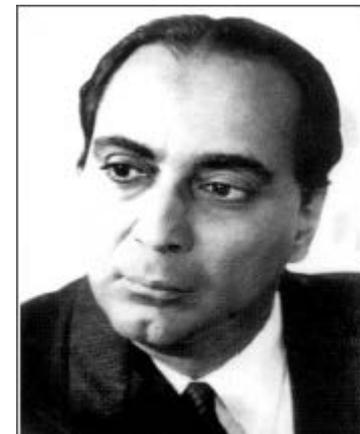
1955年：国連主催の第1回「原子力の平和利用に関する国際会議」

議長：ホミ・バーバ原子力委員長

1957年：トロンベイ原子力研究所（バーバ原子力研究

センター(BARC)の前身)の設立

- ・ アジア初の原子炉アプサラ（最大1Mwt）の運転開始
- ・ 国際原子力機関（IAEA）設立に貢献（理事国）



Homi Jehangir Bhabha
(1909-1966)

○核不拡散条約(NPT; 1970年発効)へは未加盟

1974年及び1998年に地下核実験を実施⇒その後国際社会からの支援が途絶

(それ以降は、自発的な核実験モラトリアムを宣言し維持)

「世界的な核軍縮を推進し、核兵器の無い世界の実現に向けて主導的役割を果たす」ことを明言（2004年5月に成立したマンモハン・新政権）

2006年2月：フランスとの平和利用を目的とした原子力開発に関する声明

2006年12月：NPTに未加盟のインドとの原子力協力を可能とするための、米国原子力改正法（インドを例外扱いとする）が、ブッシュ大統領の署名により成立

2007年7月：米国と原子力協力協定の交渉妥結（2008年10月署名、12月発効）

これを契機として国際社会との原子力協力が復活（各国と原子力協力協定の締結が加速）

2008年8月：IAEA理事会で対印保障措置協定案を承認

2008年9月：原子力供給国グループ（NSG）が、「インドとの民生用原子力協力に関する声明」を採択

2010年8月：インドの原子力損害賠償法の上下院での可決（同年9月公布）

2010年10月：IAEAの「原子力損害の補完的補償に関する条約（CSC）」に署名

2011年11月：原子力損害賠償法の施行規則の公布

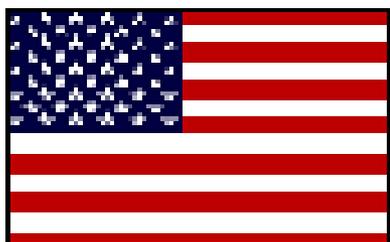
2015年4月：IAEAのCSCが発効*（同年1月に日本のCSC署名、受諾書を寄託により、締結国の原子炉の総熱出力が400GWt以上の発効条件をクリアー）

* 2015年6月現在、インドはCSCに未批准

主要国	主な動き
米国	<ul style="list-style-type: none">2008年10月10日、原子力協力協定に署名(同年12月6日発効)2010年7月30日、再処理に関する「取極め、手続き」に署名
フランス	<ul style="list-style-type: none">2008年9月30日、原子力協力協定に署名(2010年1月14日発効)
ロシア	<ul style="list-style-type: none">2010年3月12日、原子力協力協定に署名2014年4月、クダンクラム3・4号機の建設に関してロシアが原則として損害賠償請求法に同意との報道2014年12月、民生用原子力協力の強化に係る協定に署名
カザフスタン	<ul style="list-style-type: none">2011年4月15日、原子力協力協定に署名
カナダ	<ul style="list-style-type: none">2010年6月27日、原子力協力協定に署名2013年9月27日、原子力協力協定が発効
韓国	<ul style="list-style-type: none">2011年7月25日、原子力協力協定に署名
英国	<ul style="list-style-type: none">2010年2月11日、「原子力に関する共同宣言」に署名2013年2月、原子力協力協定の交渉開始に合意
日本	<ul style="list-style-type: none">2010年6月29日、原子力協力協定の交渉を開始2013年5月、首脳会談において交渉を加速させると確認2014年1月、首脳会談において早期妥結に向け交渉を続けると合意
オーストラリア	<ul style="list-style-type: none">2011年12月、政権与党である労働党がインドに対するウラン輸出を解禁することを決定2014年9月、原子力協力協定に署名

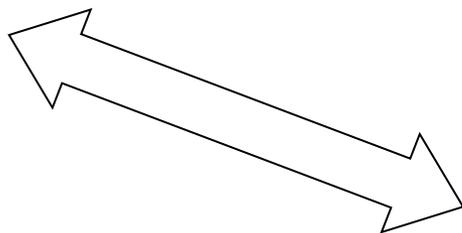
原子力供給国グループ(NSG)

- ⑦インドの例外扱いを承認 (2008.9)
- ⑬インドのNSG加盟で合意できず (2014.6)

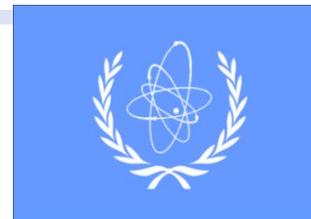


米国

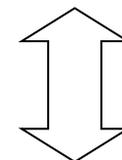
- ③ヘンリー・ハイド法の成立 (2006.12)
- ⑧米国議会による米印原子力協力協定の承認 (2008.10)



- ①米印共同声明 (2005.7)
- ④米印原子力協力協定の交渉妥結 (2007.7)
- ⑨米印原子力協力協定の署名 (2008.10)
- ⑩米印原子力協力協定の発効 (2008.12)
- ⑮原子力損害賠償問題と協定対象核物質の追跡と計量に係る課題につき両国で合意に達したことを発表 (2015.1)



IAEA



- ⑥保障措置協定のIAEA理事会での承認 (2008.8)
- ⑪ 選択された民生用原子力施設に係る保障措置協定締結 (2009.2)
- ⑫追加議定書署名 (2009.5)
- ⑭追加議定書発効 (2014.7)



インド

- ②軍民とされず分離計画の策定 (2006.3)
- ⑤インド議会による政権の信任投 (2008.7)

米印原子力協力の実現に向けた課題

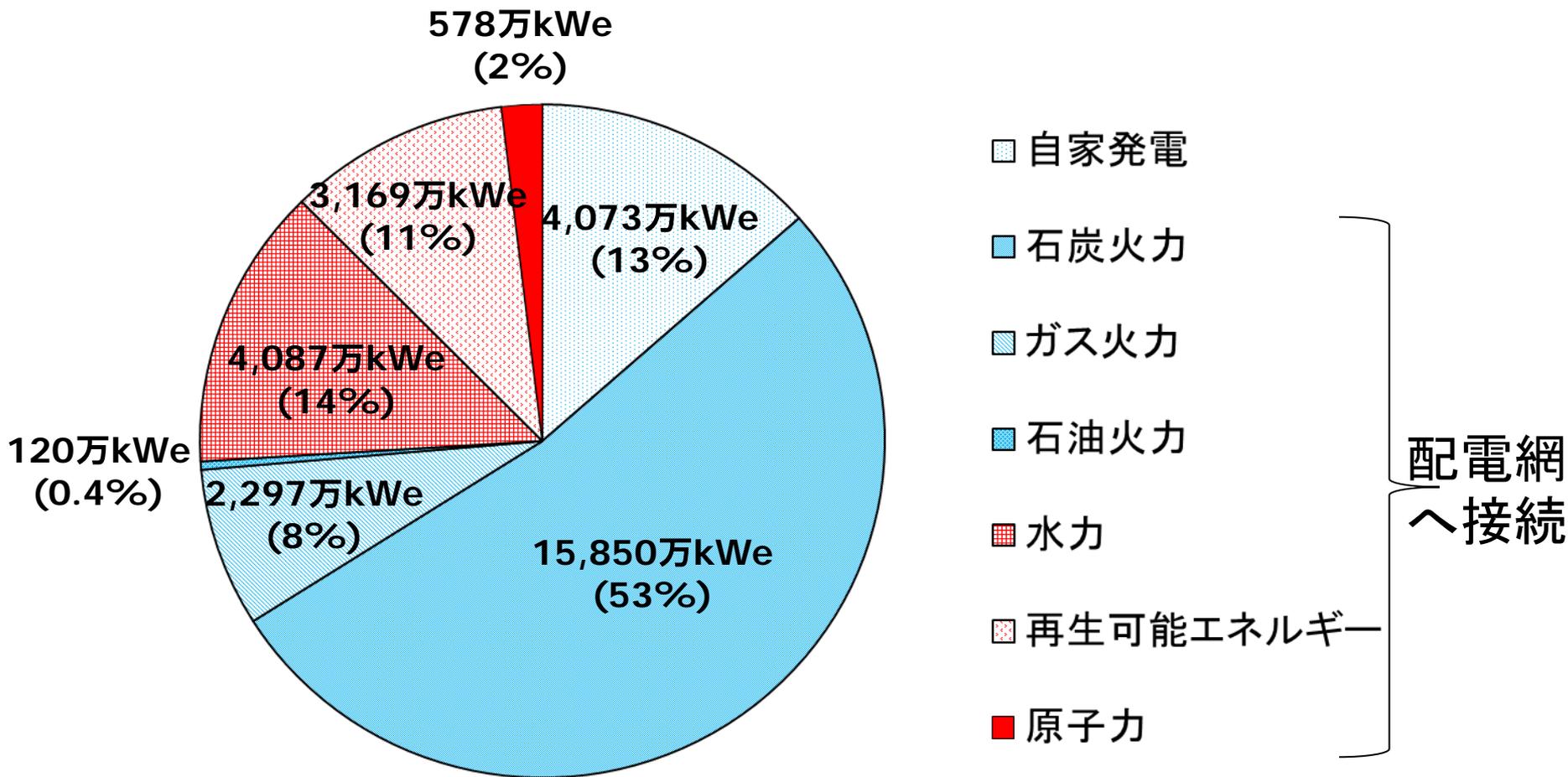
原子力損害賠償責任に関するインドの国内法規定の取り扱い等

- 2010年8月30日、原子力損害賠償法がインド議会で可決されたが、供給された原子力資機材の瑕疵が原因で原子力事故が起きた場合に原子力運転者から供給者への求償権を認めているため、他国からの原子力資機材の供給の阻害要因になりかねないとして米国等の供給国が是正措置を要求。2015年1月、米印両国は、インド国内法を改定せず、インドが、同国の保険会社から成り、インド政府も出資する1億2,200万ドル相当の原子力プールを設立すること等を発表。ただし、2015年2月現在、米国原子力産業界は様子見の状況。
- インドは2010年10月、原子力損害の補完的補償に関する条約(CSC)に署名しているが、2015年2月現在、未批准。

インドのエネルギー事情等

- **世界第二位の人口大国**: 12億6740万人(世界人口白書2014)、2028年頃には中国を抜くと予測
- **高い経済成長率**: GDPは6.3%/年(2010~2035年平均)で増大
- **急速な経済成長と人口増加のため一次エネルギー消費量が急増**:
 - 一次エネルギー消費量(2010年): 中国、米国、ロシアに次ぐ世界第4位(約5%)
 - CO2排出量(2010年): 中国、米国に次ぐ世界第3位(約5%) ⇒ 政府は、2020年までにGDP当たりのCO2排出量を2005年比で20~25%削減する自主目標を発表
- **一次エネルギー消費量の増加に加え、中間層の増加や生活水準の向上のために電力需要も近年飛躍的に増大しており、電力不足も深刻**:
 - 電力普及率が約75%(約3億人の方が電気にアクセスできない状況)
 - 都市部を中心に停電が頻発(経済成長の阻害要因)
- **環境汚染の問題**
 - 石炭火力、モータリゼーション等による都市部での深刻な大気汚染
- **政府の発電設備の増設計画**

	火力	水力	原子力	再生可能エネルギー	合計
第12次5カ年計画 (2012~2016年度)	6380万kW	920万kW	280万kW	1850万kW	9550万kW



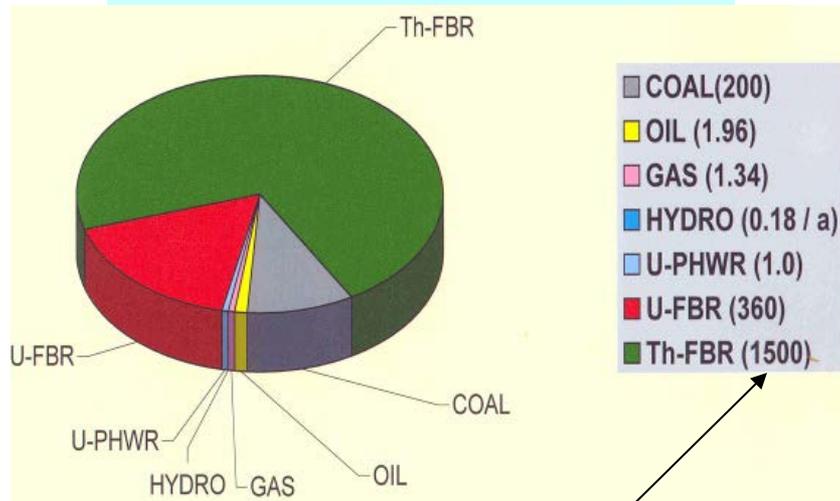
全発電設備容量: 3,017万kWe

出典: "Executive summary Power sector," Ministry of Power Central Electricity Authority, Government of India (2015)

インドのエネルギー事情等

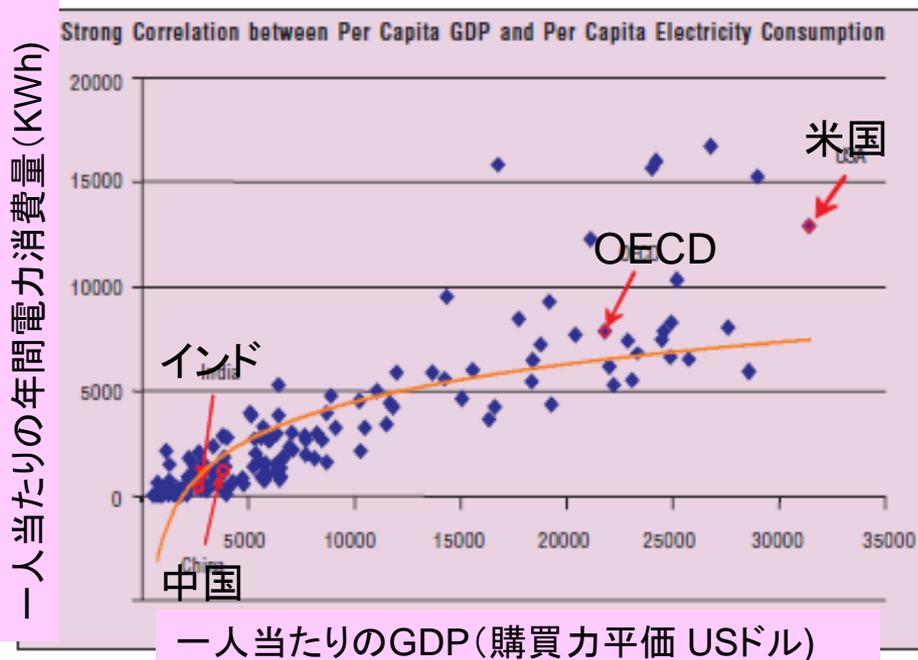
- 2004年に、インド原子力庁（DAE）は電力成長戦略を発表
- 一人当たりの国内総生産（GDP）と年間電力消費量の間には相関あり。
- 生活水準を先進国並みに向上させるには、一人当たりの年間電力消費量を今後約50年間で8-10倍程度増大させることが必要
- エネルギー安定供給と環境負荷低減→原子力発電の大幅な増大が必要

インドの国内資源量



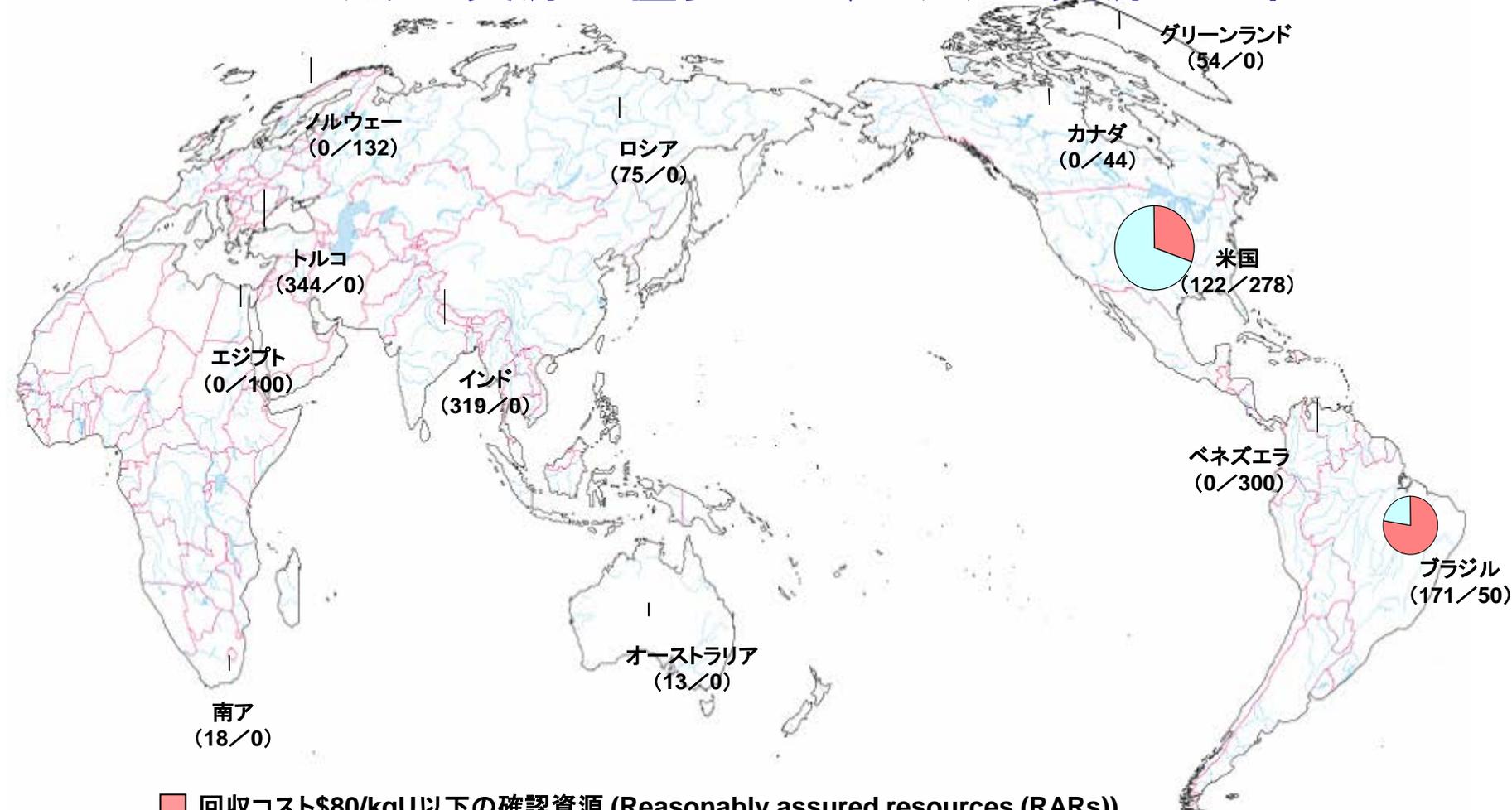
**エネルギー資源量
(10億トンの石炭と等価換算: BTCE)**

インド:約600kWh, 中国:約1500kWh, 日本:8000kWh, 米国:約14000kWh(2003年度統計;世界国勢図会)



出典: Dr. Anil Kakodkar, "Nuclear Energy in India- Retrospect and Prospects,"
An International Journal of Nuclear Power-Vol.18, No.2-3 (2004)

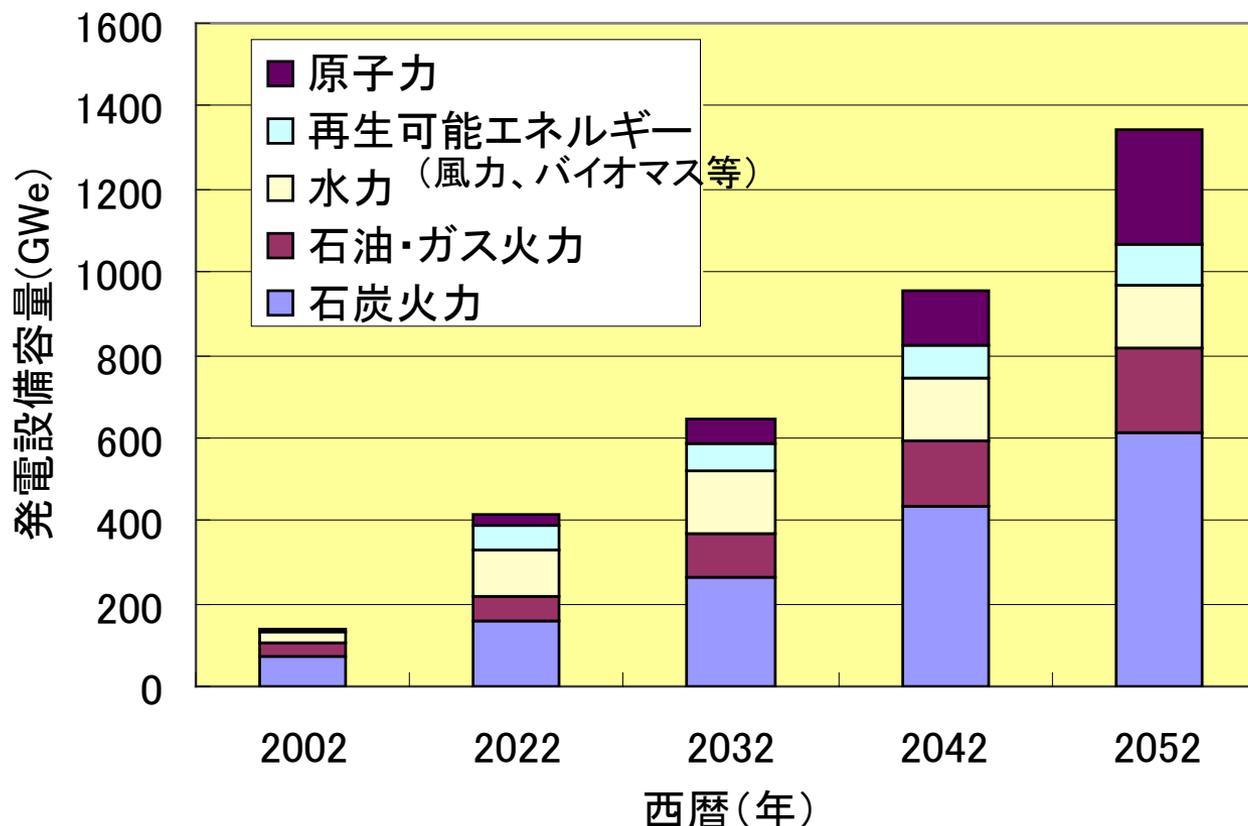
インドのウラン資源は僅少だが、トリウム資源が豊富



■ 回収コスト\$80/kgU以下の確認資源 (Reasonably assured resources (RARs))
■ 回収コスト\$80/kgU以下の推定追加資源 (Estimated additional resources, category I (EAR-I))
 (確認資源量 / 推定追加資源量; 単位1,000tU)

データ: IAEA, 2007 (from Technical Meeting, 2005/9)

インドの電力設備容量の増設計画



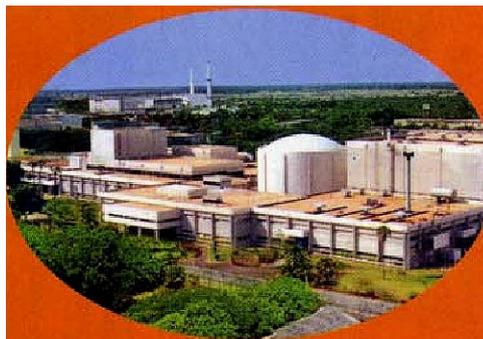
出典: Dr. Anil Kakodkar, "Nuclear Energy in India- Retrospect and Prospects," An International Journal of Nuclear Power-Vol.18, No.2-3 (2004)

1. インドの原子力開発の歴史とエネルギー事情等
2. 三段階の原子力開発計画と開発体制
3. 原子炉と関連サイクルの開発の現状と今後の計画
4. まとめ

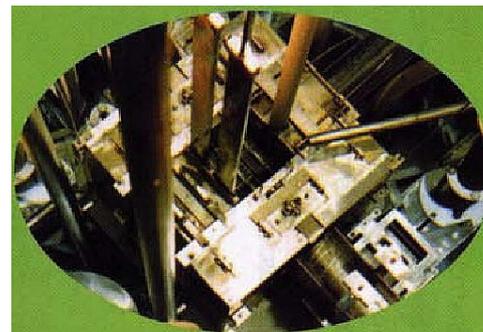
インドの原子力開発計画（三段階方式）



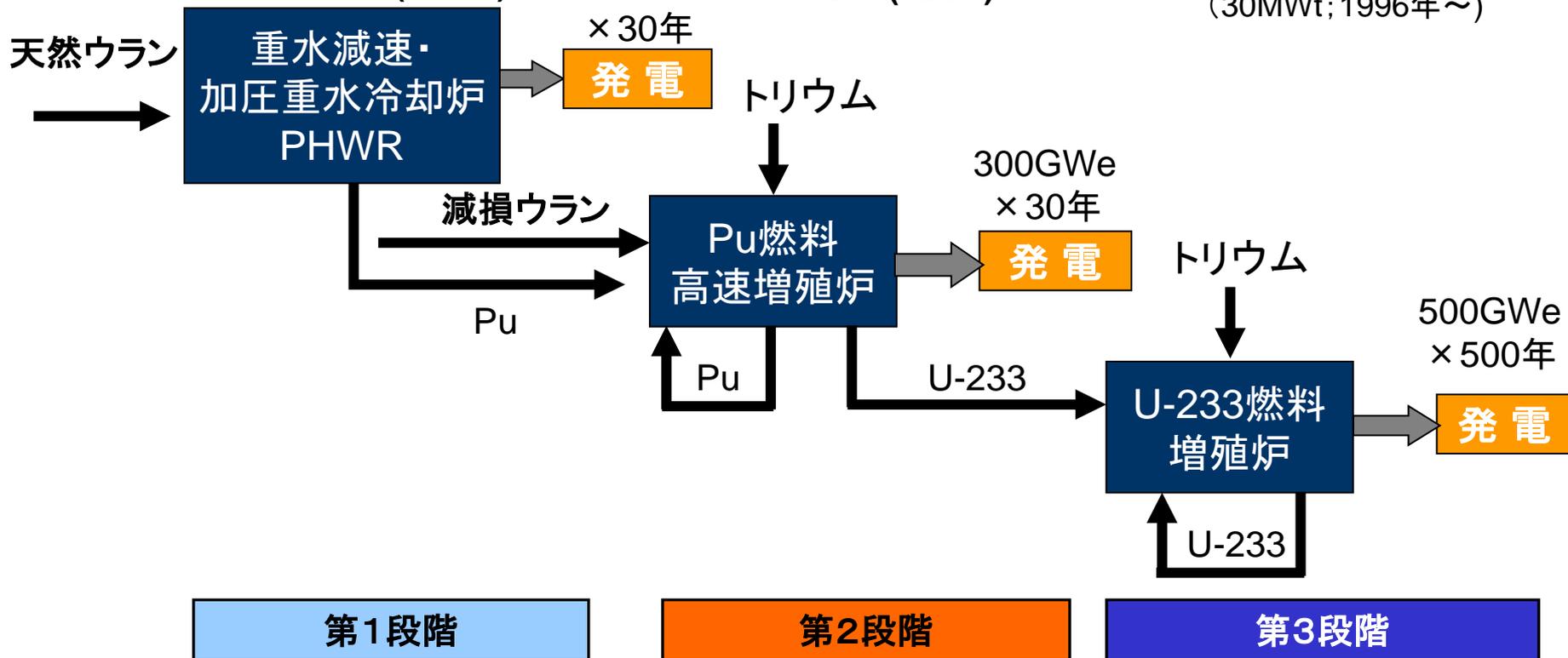
U-235 (MAPS)



Pu-239 (FBTR)



U-233 (KAMINI)
(30MWt; 1996年～)

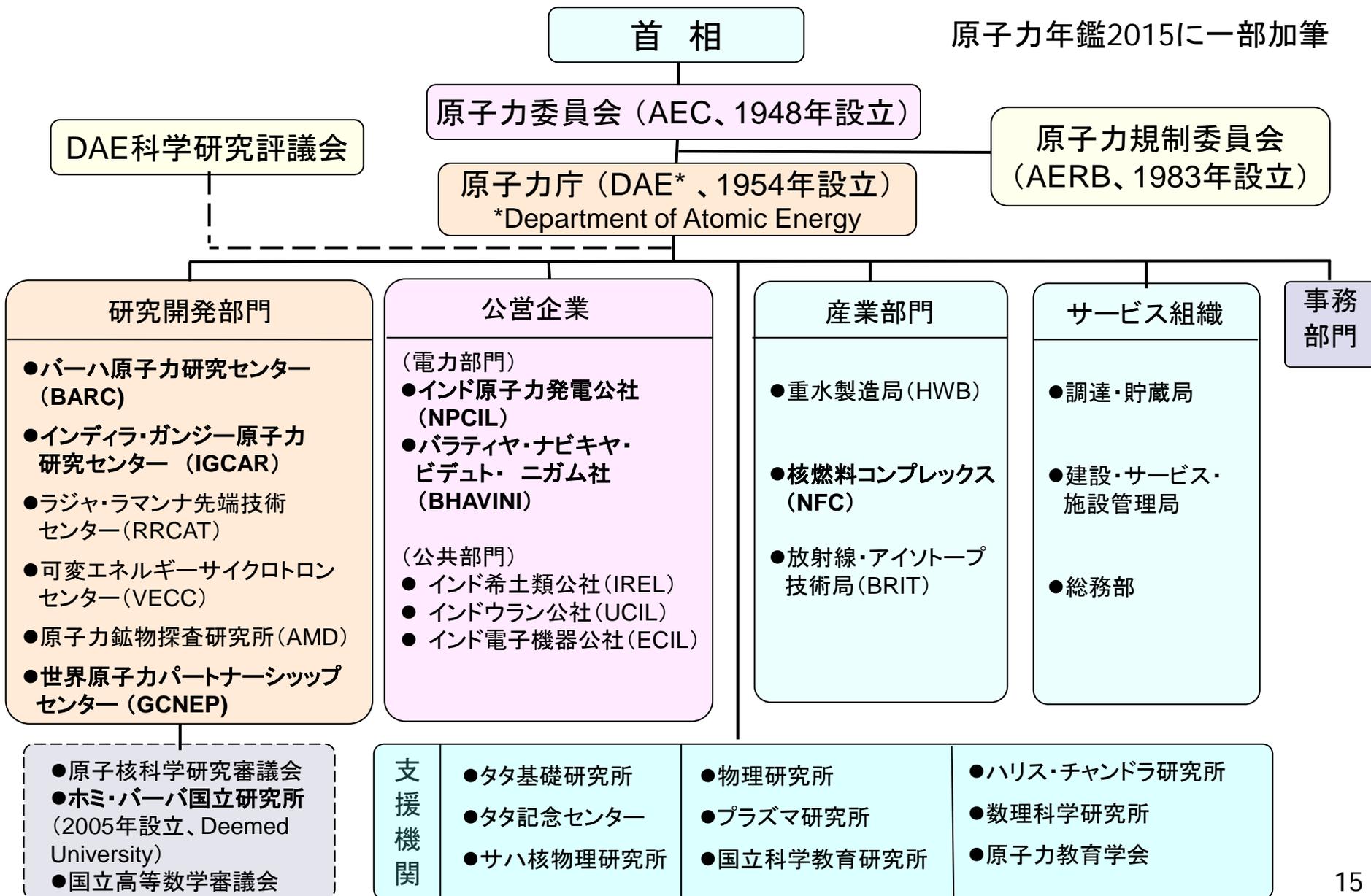


インドの三段階の原子力開発

1. インド原子力発電公社 (NPCIL)を中心とした第一段階の原子力開発
(重水減速・加圧重水冷却炉(PHWR)サイクル等)
2. インディラ・ガンジー原子力研究センター(IGCAR)を中心とした第二段階の原子力開発
(高速増殖炉(FBR)サイクル)
3. バーバ原子力研究センター(BARC)を中心とした第三段階の原子力開発
(新型重水炉(AHWR)等の開発)

インドの原子力開発体制

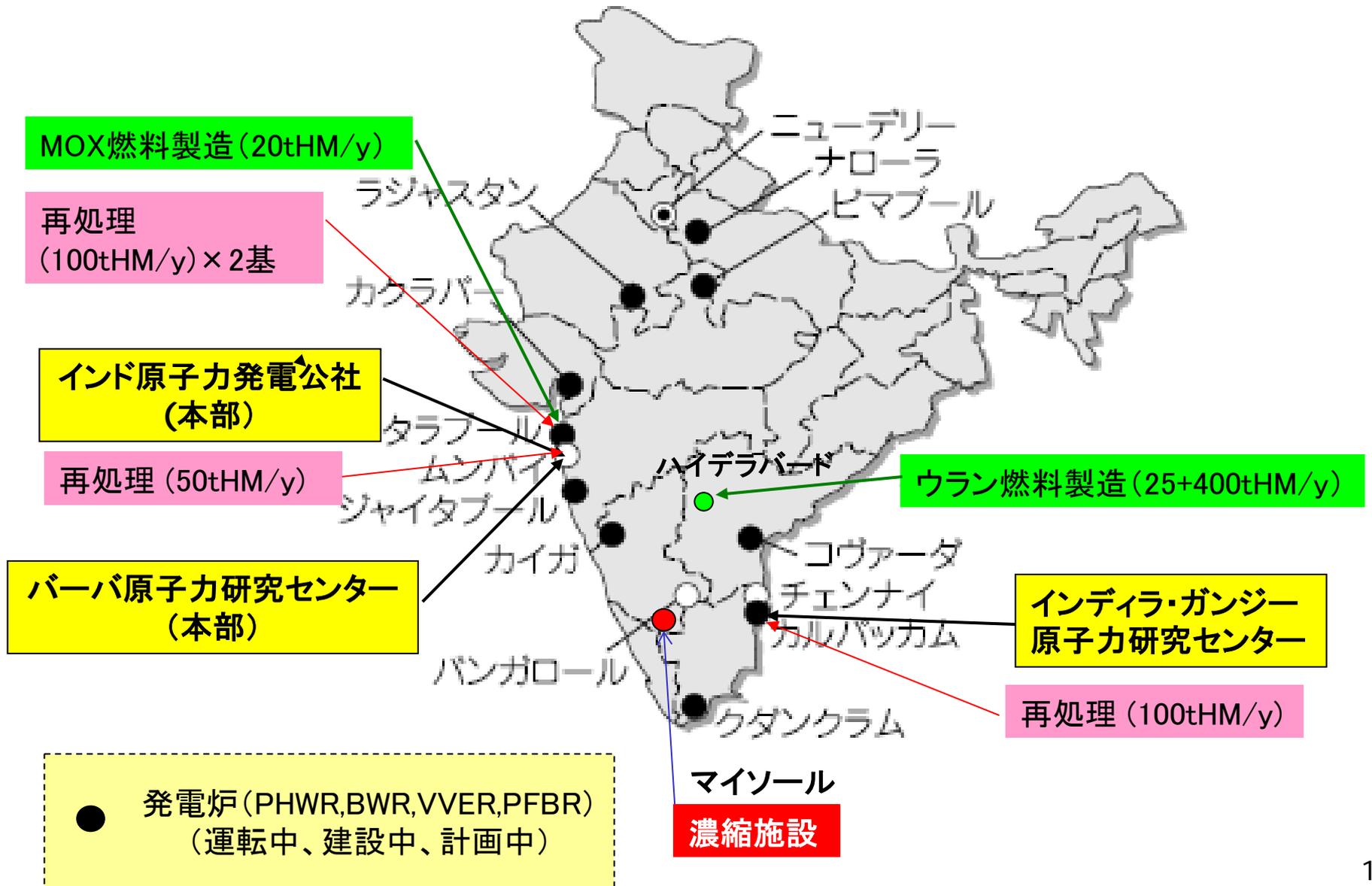
原子力年鑑2015に一部加筆



3. 原子炉と関連サイクルの 開発の現状と今後の計画

3.1 インド原子力発電公社(NPCIL)を中心とした 第一段階の原子力開発 (重水減速・加圧重水冷却炉(PHWR)サイクル等)

インドの主要な原子力施設

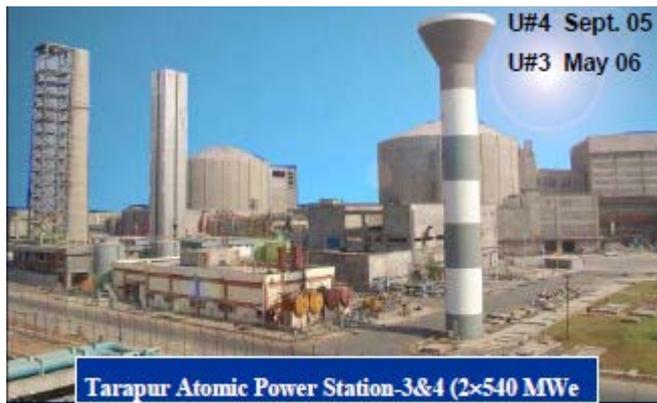


- 1987年に設立、職員数は約13,000人、世界原子力発電事業者協会(WANO)にも加入
- 原子力発電所のサイト選定から、設計・建設・運転、デコミまで実施
- 運転員の教育訓練は、NPCIL各所、BARC、WANOのトレーニングセンターを利用して実施。多数の発電炉を同時期に作ることを通して、OJT教育も実施

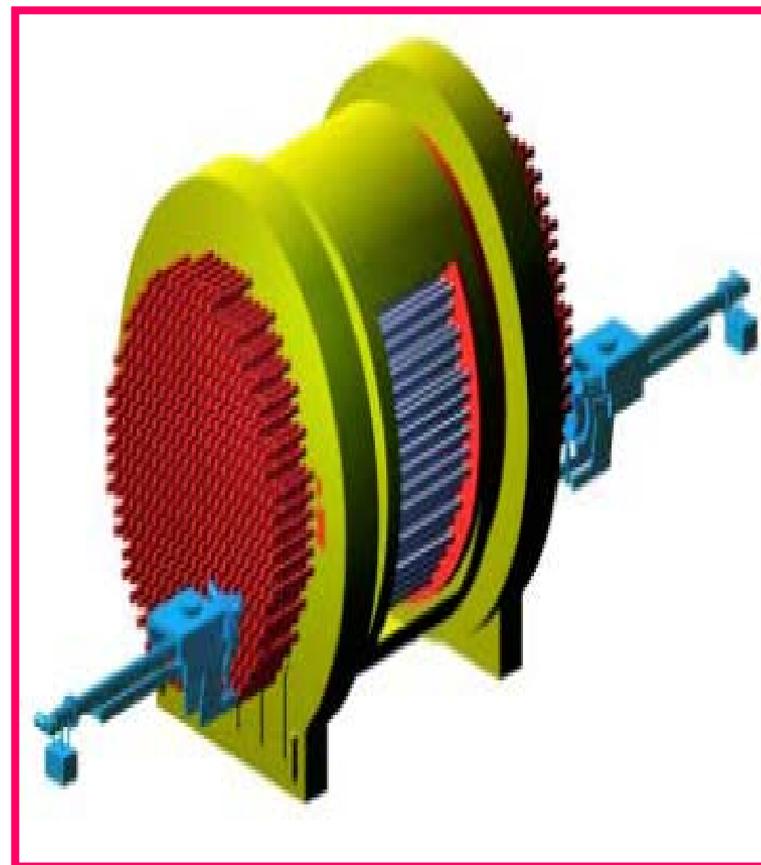
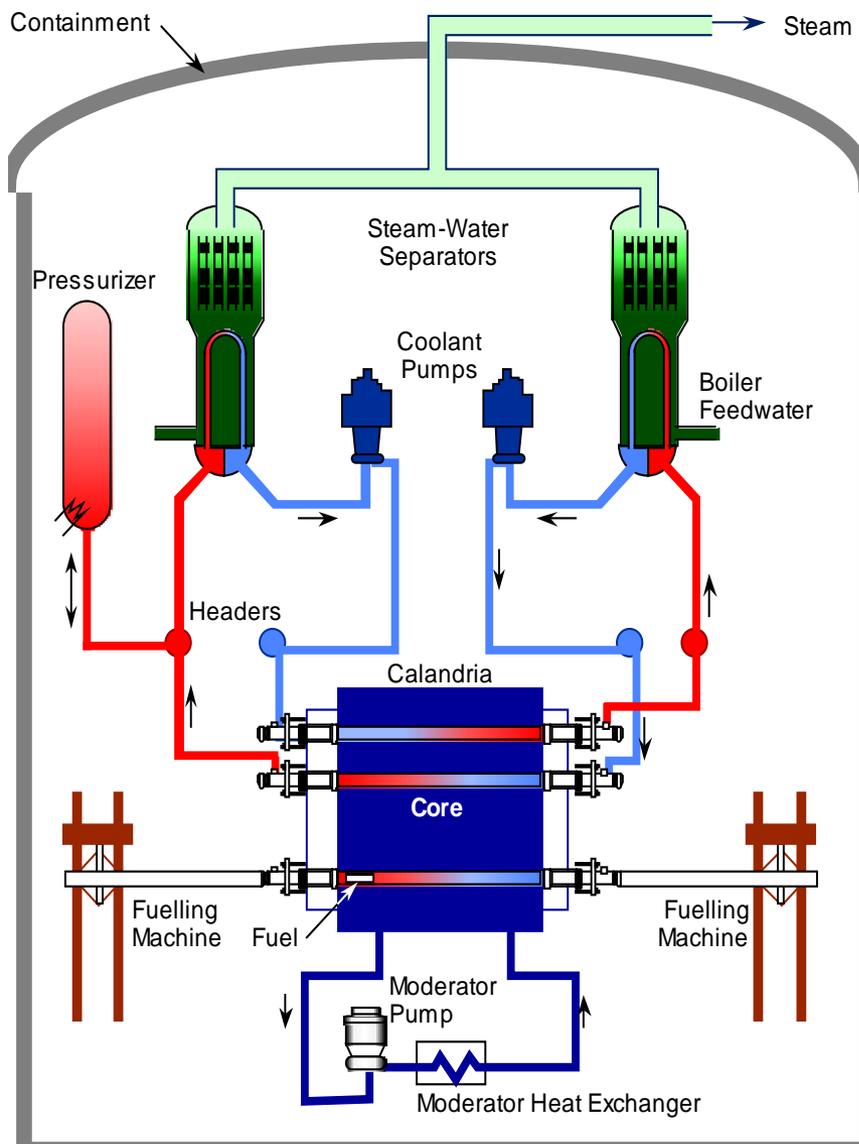
発電所名(場所)	運転中	建設中
タラプール	BWR 16万kWe × 2; PHWR 54万kWe × 2	
ラジャヤスタン	PHWR 10万kWe × 1; 20万kWe × 1; 22万kWe × 4	PHWR 70万kWe × 2
マドラス/カルパッカム	PHWR 22万kWe × 2基	(PFBR 50万kWe × 1)
ナローラ	PHWR 22万kWe × 2基	
カルラパー	PHWR 22万kWe × 2基	PHWR 70万kWe × 2
ガイガ	PHWR 22万kWe × 4	
クダンクラム	VVER 100万kWe × 1	VVER 100万kWe × 1
合計	578 万kWe (21基)	430 万kWe(6基)

特徴：

- ①燃料として天然ウランが利用可能（濃縮が不要）
- ②減速材に重水を利用→中性子経済が良い
- ③圧力管型炉→高圧の原子炉容器が不要（国内製造が可）
- ④重水（減速材、冷却材）は自国で製造
- ⑤運転中の燃料交換が可能（燃料は横置き）



PHWRのフロー図と燃料交換装置

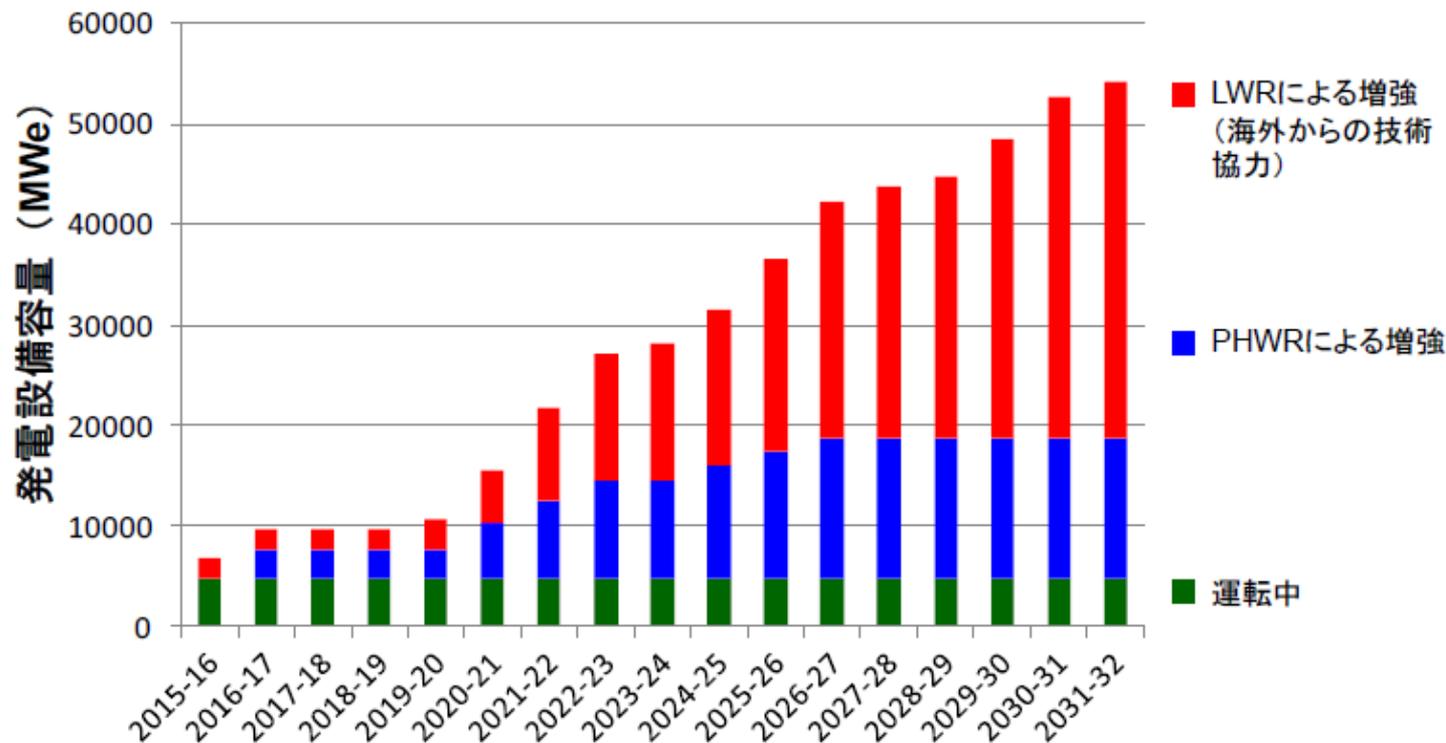


- 地下核実験により関係国の支援を絶たれたため、独自に初期導入技術 (CANDU) の内容を分析し、改良・標準化・大型化を達成。現在では、カナダに次ぐ有数の重水炉(技術)保有国
- 現有の54万We炉と70万We炉の炉心構成は同一であり、54万kWeでの運転経験に基づき、出力増大を図っている。
- 一方で技術開発が原子力側に傾き、国内インフラの未整備もあって、電源設備としての大型化・高性能化には至っていない。
- 現在、18基のPHWR(総発電設備容量で446万kWe)を運転中。
- 以前は、燃料不足のため運転の一部停止や、出力を半減して運転(2006-07年の設備利用率は63%)していたが、2015-16年(2015年4月まで)の設備利用率は86%を達成
- PHWRの設備利用率向上のために高燃焼度化も検討しているが、燃料健全性の担保が課題

- 米国製の沸騰水型軽水炉(BWR; 16万kWe)を導入し運転。濃縮ウラン燃料の供給元は、米国、フランス、中国と変遷し、現在はロシア。
- 自国のウラン資源と技術だけでは、急速な電力需要の伸びに対応できないため、海外から濃縮ウラン付きで大型軽水炉の導入(4,000万kWe)を図っている。
- ロシア製PWR(VVER 100万kWe × 2)を導入し、その内の1基は既に運転中で、1基は建設中。
- フランスのアレバ、WH-東芝、GE-日立ニュークリア・エナジー等との軽水炉導入の覚書を締結。
- 上記を実現するための、原子力協力協定の締結、IAEAとの保障措置協定の締結、原子力損害賠償法等の法整備を進めている。
- 2015年2月に、インドのLarsen & Toubro(L&T)がフランスのアレバとの間で、ジャイタプールに建設するEPRを現地に合うように最適化する協力覚書を締結(大型鍛造品の協力を含む)
- インド独自のPWRも開発中(炉物理や炉心設計等)、

原子力発電設備容量の拡大

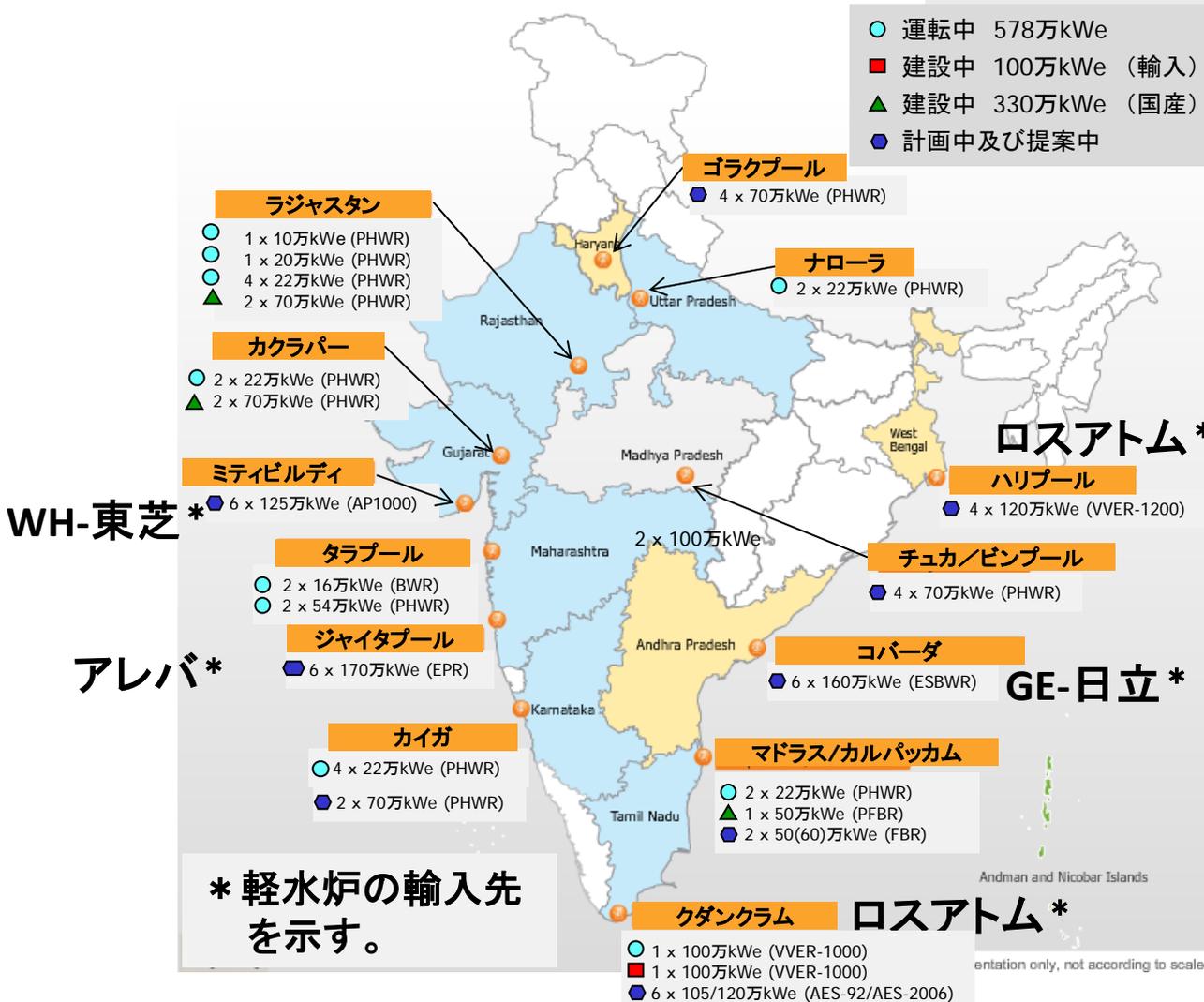
- 現在： 578万kWe
- 2017年（現在建設中の原子炉が完成）： 1,008万kWe
- 2021～2022年（現在計画中の原子炉が完成）： 2,708万kWe
- 2032年（国産技術によるPHWR、FBR＋海外から技術協力によるLWR）： 4,800～6,300万kWe



出典：S.A. バルドワジ、「インドの原子力開発プログラム」、第48回原産年次大会（2015年4月）（一部追記）

http://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/04/原産大会48th_シブ・アビラシュ・バルドワジ_fix.pdf

インドの運転中、建設中、計画中・提案中の 原子力発電所サイト (2015年5月)



運転中 21基 (578万kWe)
 建設中 6基 (430万kWe)
 上記の出典: NPCLのホームページ

計画中 22基 (2,130万kWe)
 提案中 35基 (約4,000万kWe)
 上記の出典: WNA, "Nuclear Power in India," (May 2015)

- 左記以外の提案中プラント
- AHWR 30万kWe × 1
 - Mahi Bansware 70万kWe × 2 (PHWR)
 - Rajouli, Nawada 70万kWe × 2 (PHWR)
 - 100万kWe × 2 (PWR)
 - Markandi (Pati Sonapur)
 - Nizampatnam
 - Pulivendula

燃料製造と再処理施設

名称	所属 場所	型式 操業開始	処理能力 (tHM/年)	機能
濃縮ウラン燃料製造プラント(EFFP)	核燃料コンプレックス(NFC) ハイデラバード	BWR 1974年	25	輸入した濃縮ウランからBWR燃料集合体を製造
酸化ウラン燃料製造プラント		PHWR 1973年	400	PHWR燃料集合体を製造
ジルカロイ製造プラント		1971年		燃料被覆管、PHWRの圧力管、カランドリア管など
先進燃料製造施設(AFFF)	BARC タラプール	MOX 1990年	20	BWR,PHWR,PFBR用のMOX燃料

名称	所属 場所	処理対象燃料	操業開始	処理能力 (tHM/年)	機能
研究炉燃料再処理プラント	BARC トロンベイ	研究炉	研究用1964年 /1983-84年に改造	50	
発電炉燃料再処理プラント(PREFRE1)	BARC タラプール	PHWR	商業規模 1977年	100	・Puは、AFFFでMOX燃料に加工してFBTRに供給
発電炉燃料再処理プラント(PREFRE2)	BARC タラプール	PHWR	商業規模 2011年	100	・Puは、AFFFでMOX燃料に加工してFBTRに供給
カルパッカム再処理プラント(KARP)	BARC カルパッカム	PHWR FBTR	商業規模 1998年	100	・Puは、AFFFでMOX燃料に加工してPFBRに燃料を供給予定

3. 原子炉と関連サイクルの 開発の現状と今後の計画

3.2 インディラ・ガンジー原子力研究センター(IGCAR)を 中心とした第二段階の原子力開発 (高速増殖炉(FBR)サイクル)



インディラ・ガンジー原子力研究センター(IGCAR) を中心とした第2段階の原子力開発

- ナトリウム冷却FBRサイクルの研究開発を行うために、1971年に設立
- 職員数は約2,500人（その内、技術者・科学者は1,243人）
- 現在の主な業務：
 - 高速増殖試験炉(FBTR)の運転
 - 高速増殖原型炉(PFBR)プロジェクト支援
 - FBTR燃料をPUREX法で再処理するための鉛ミニセル(LMC)を運転中
 - PFBR燃料再処理の実証プラント(DFRP; 1t/y)の建設中
 - 統合型高速炉燃料サイクル施設(FRFCF)を建設中
 - 金属燃料の乾式処理研究、工学規模の試験施設も建設中
 - 上記に関連したR&D
- PFBRは、FBRの建設・運転のために設立されたBHAVINI(バラティヤ・ナビキヤ・ビデウト・ニガム社)によって建設中
- U-233燃料を用いた研究炉KAMINI(熱出力30kW)も運転中
- 国際協力：
 - 2010年12月、DAE-CEA 原子力研究開発に関する取決めを締結(FBR安全性等について協力)
 - 2010年12月、DAE-ROSATOM 次世代のFBR開発を含む協力覚書を締結

○高速実験炉(FBTR:4万kWt.,1.35万kWe)建設でスタート

- ・ 1969年仏と協定 ラプソディーと同設計に発電設備を追加
- ・ 1985年から運転開始

○高速原型炉(PFBR:50万kWe)を国産技術で設計建設

- ・ 2004年 着工
- ・ 2015年 初臨界達成予定

○PFBR以降

- ・ 60万kWe FBR 2基 (ツインプラント)を2022年-2023年に運転開始予定
(PFBRより経済性・経済性の向上を図る)

○金属燃料開発のため、2025年までに120MWtの金属燃料高速試験炉を運転開始予定

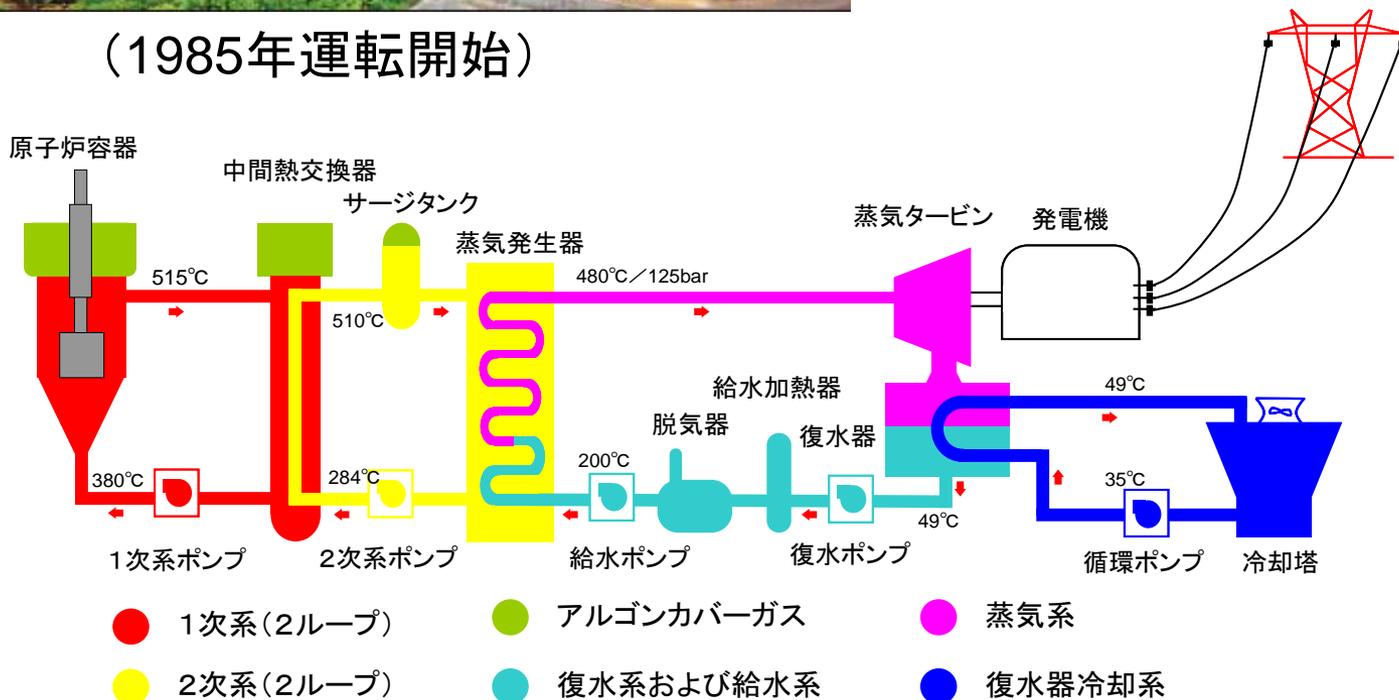
○高増殖の金属燃料FBRに移行

(金属燃料を用いた高速炉サイクル技術の成熟(商用化)までは、MOX燃料を用いた高速炉サイクルと併用)



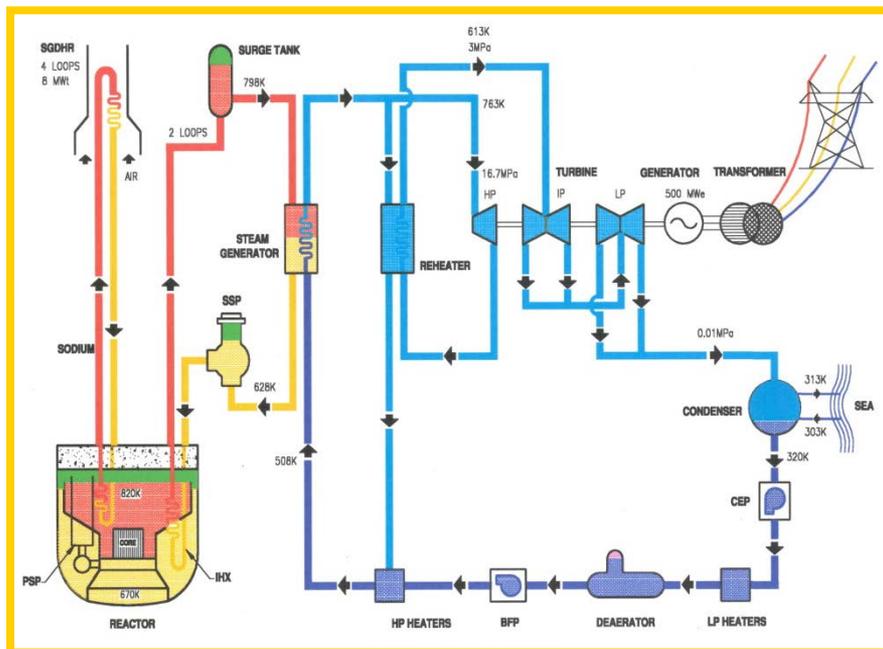
(1985年運転開始)

- 40 MWt / 13.5 MWe
- ループ型(1次系、2次系 各2ループ)
- 蒸気発生器 4基
- 蒸気タービン 1基
- 燃料: PuC-UC



- 1969年にフランスCEAと契約
- 1974年に建設開始され1984年に完成
- 蒸気発生器とタービン以外は、フランスのラプソディと同じ設計
- 原子炉部品の80%以上が国産(ナトリウムについても市販のものをセンター内の精製装置で原子炉級レベルまで純化して使用)
- 設計当初は酸化物燃料を用いる予定だったが、(1974年の核実験のため)小型炉心用の高濃縮ウランが手に入らなくなったため、酸化物燃料に比べて高密度で高Pu富化度が可能な炭化物燃料(PuC-UC; BARCで製造)に変更
- 1985年10月 初臨界 *MK-I 燃料: 70%PuC-30%UC*
- 小型炉心(1MWt)で、炉物理、システム、安全性試験等を実施、その後炉心周辺にMK-II燃料(*55%PuC-45%UC*)を設置して出力を増強
- 1993年1月 蒸気発生器を設置、12月に10.5MWtを達成
- 1997年7月 送電開始
- 外側炉心をMOX燃料とする炉心のハイブリッド化を実施
- PFBR用MOX燃料集合体や金属燃料の照射に利用

高速増殖原型炉 (PFBR)

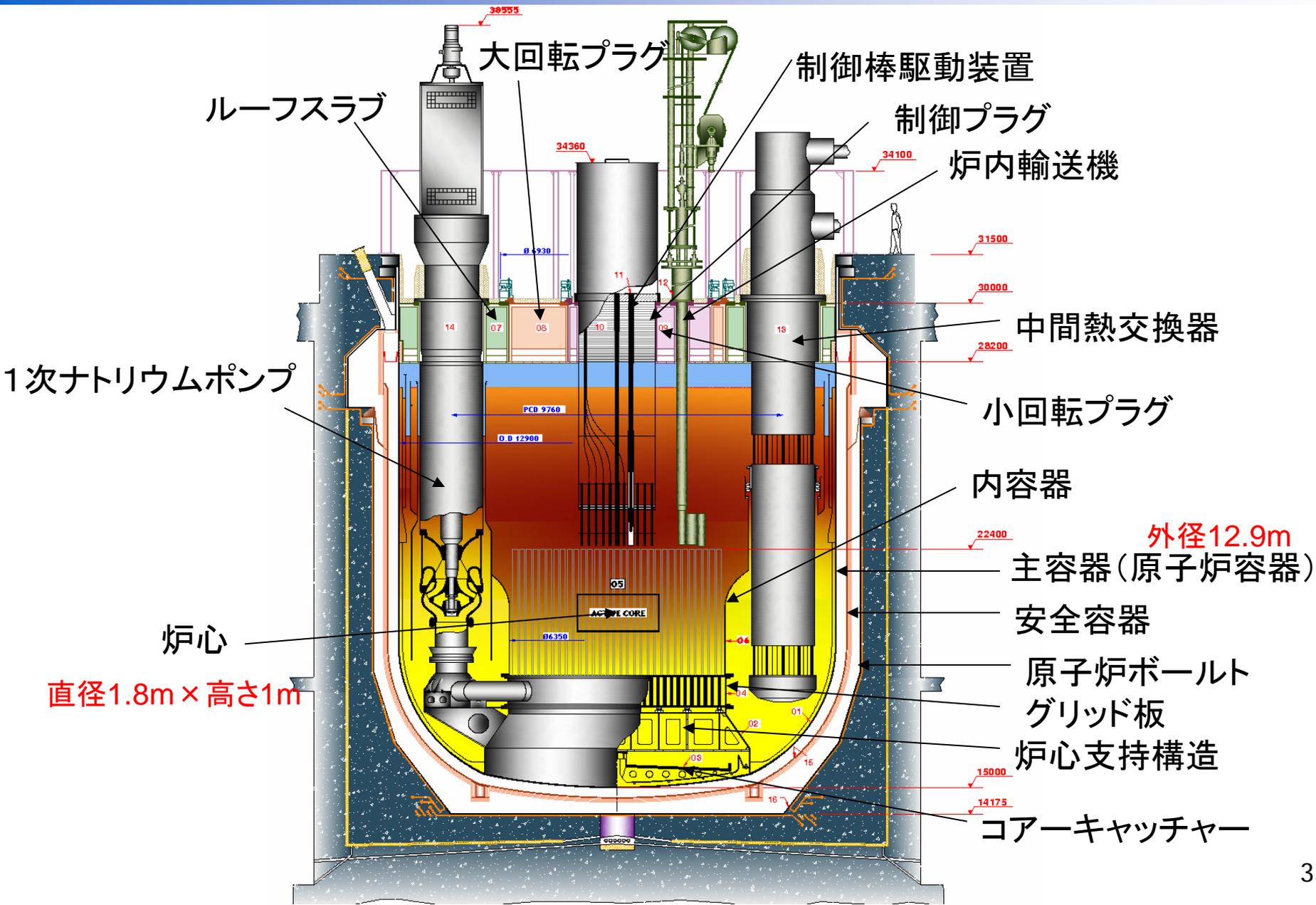


電気(熱)出力	500 MWe (1200 MWt)
型式(1次系)	プール型(タンク型)
原子炉冷却材	ナトリウム
燃料	(Pu,U)O ₂
1次系入/出口ナトリウム温度	397°C/547°C
1次ナトリウムポンプ	2
中間熱交換器	4
2次ナトリウム系	2
蒸気発生器(1ループ当たり)	4
タービン発電機	1
蒸気条件	490°C、16.7 MPa
設計寿命	40年

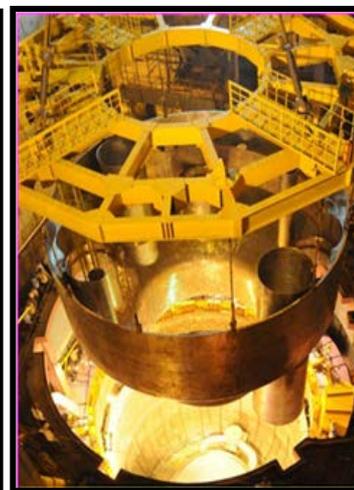
- インド独自で設計(ナトリウム冷却系の2ループ化、使用材料の削減等)・建設
- 2003年9月に政府が予算認可
- BHAVINIが建設
- 2015年 初臨界達成予定(2015.6月時点の進捗率97.635%)

- 2002年 詳細設計を完了
 - 2003年9月 予算認可（建設費： エスカレーション込みで349.2億ルピー（7.75億ドル、2.7円/ルピー換算で943億円、 エスカレーション無しで280億ルピー(6.22億ドル、756億円)）と試算）
 - 2004年10月 建設・運転（後継炉を含む）を行うために新会社（BHAVINI）を設立し、建設開始
 - 2004年12月 基礎コンクリートの施工開始直後に、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、既設厚さ1.2m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（再開に4.5ヶ月）
 - 2015年に初臨界達成予定
- 建設場所： カルパッカムのベンガル湾に面した海岸（IGCARの北側）
- 原材料以外は全てインド製で、安全容器、原子炉容器等はサイト近傍に設置された機器組立工場で作製し、レールで運搬

高速増殖原型炉(PFBR)の原子炉断面図



PFBRの建設・機器製作状況



主容器 (原子炉容器)

熱遮蔽版

グリッド板

内容器

ルーフスラブ 34

高速増殖炉 (FBR) の開発計画

プロトタイプによる概念実証
設計、製造、安全性レビュー
経験

経済性と安全性の向上

革新的機能を採用

MFBR 1000 MWe

FBR - 500 MWe
MOX、プール型、国産
初の500 MWe基
現在、試運転の最終段階
2015年末に臨界予定

FBR - 600 MWe
MOX、プール型、
ツインユニット、国産

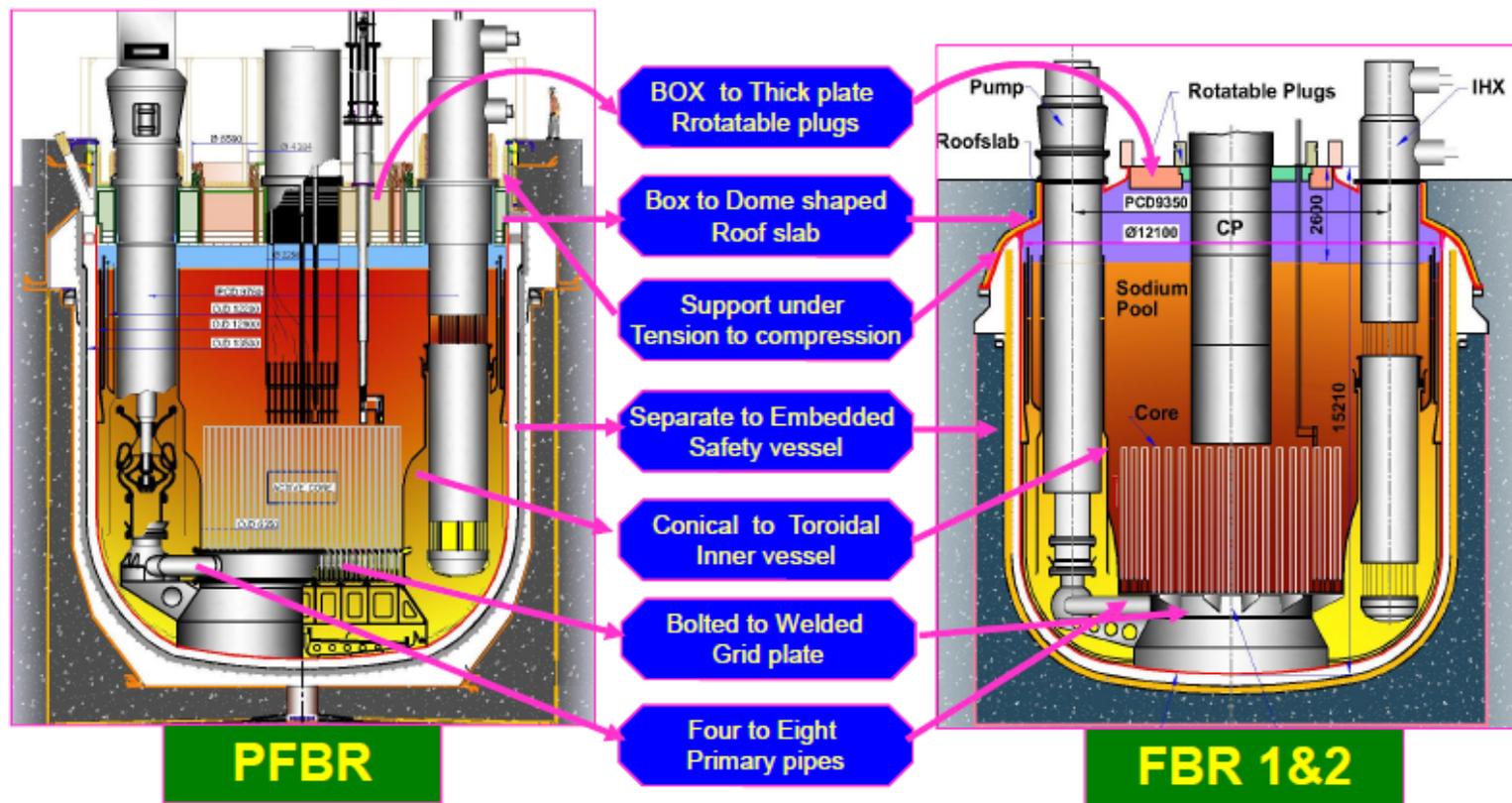
金属燃料実証高速炉
- 500 MWe
同じ原子炉概念
国産

金属燃料高速試験炉
(約10万kWt)の導入
に向けて、IGCARと
BARCで設計研究中

FBTR、40Mwt、13.5MWe
ループ型(Pu-U)炭化燃料
1985年より稼働

運転経験

Reactor Assembly of PFBR & FBR-1



Motivation to introduce innovations

PFBR construction experience, significant saving in capital cost and reduced construction time, features to be adopted for future SFRs

再処理

- パイロットプラント (CORAL)
(旧鉛ミニセル)
 - ・2003年からFBTR (炭化物燃料) を処理
 - ・プロセスフローシートと装置評価

 - 実証フェーズ (DFRP) 2014年から試運転？
 - ・FBTR燃料 : 100kg/年
 - ・PFBR燃料 : 1トン/年

 - 商業規模
 - ・高速炉サイクル施設 (FRFCF) *
 - ・PFBR炉心燃料 : 7.5トン/年
 - ・PFBRブランケット : 6.5トン/年
 - ・将来、50トン/年に拡張予定
(FBR 1&2の燃料処理も行う)
- * 燃料製造、再処理、廃棄物処理を統合



FBTR用燃料

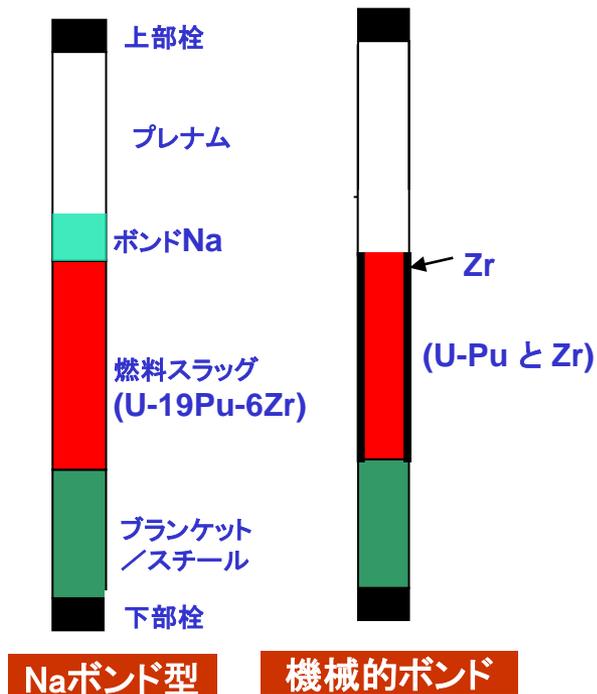
- 混合炭化物燃料は、BARC(ムンバイ)の放射性冶金部で製造
- FBTR用のMOX燃料は、タラプールにあるBARCの先進燃料製造施設(AFFF)で製造。

PFBR用燃料

- 初期の数(few)炉心燃料は、AFFFで製造予定
- その後の炉心燃料は、パルパッカムのFRFCFで製造予定
- PFBR用の試験集合体がAFFFで製造され、FBTRで照射

金属燃料の開発

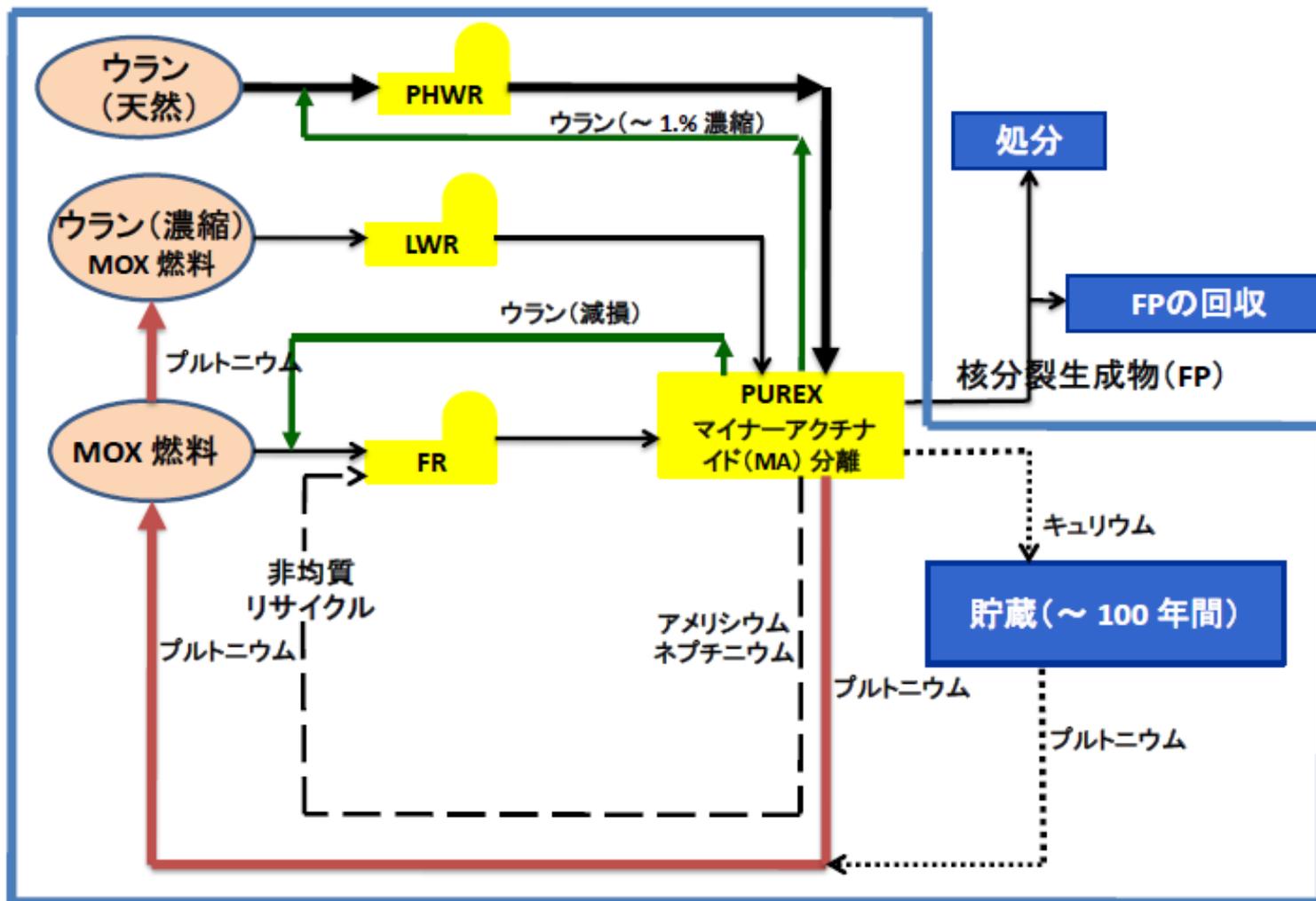
- 電力需要の急激な伸びに対応するため、原子炉倍増時間(DT)の短縮が必要
 - MOX燃料: 増殖率(BR): ~1.2、DT=約30年
 - 金属燃料(Zr合金): DT=12年
 - 金属燃料(Zr無し): BR= 1.4-1.5、DT=8年



金属燃料ピンの候補概念

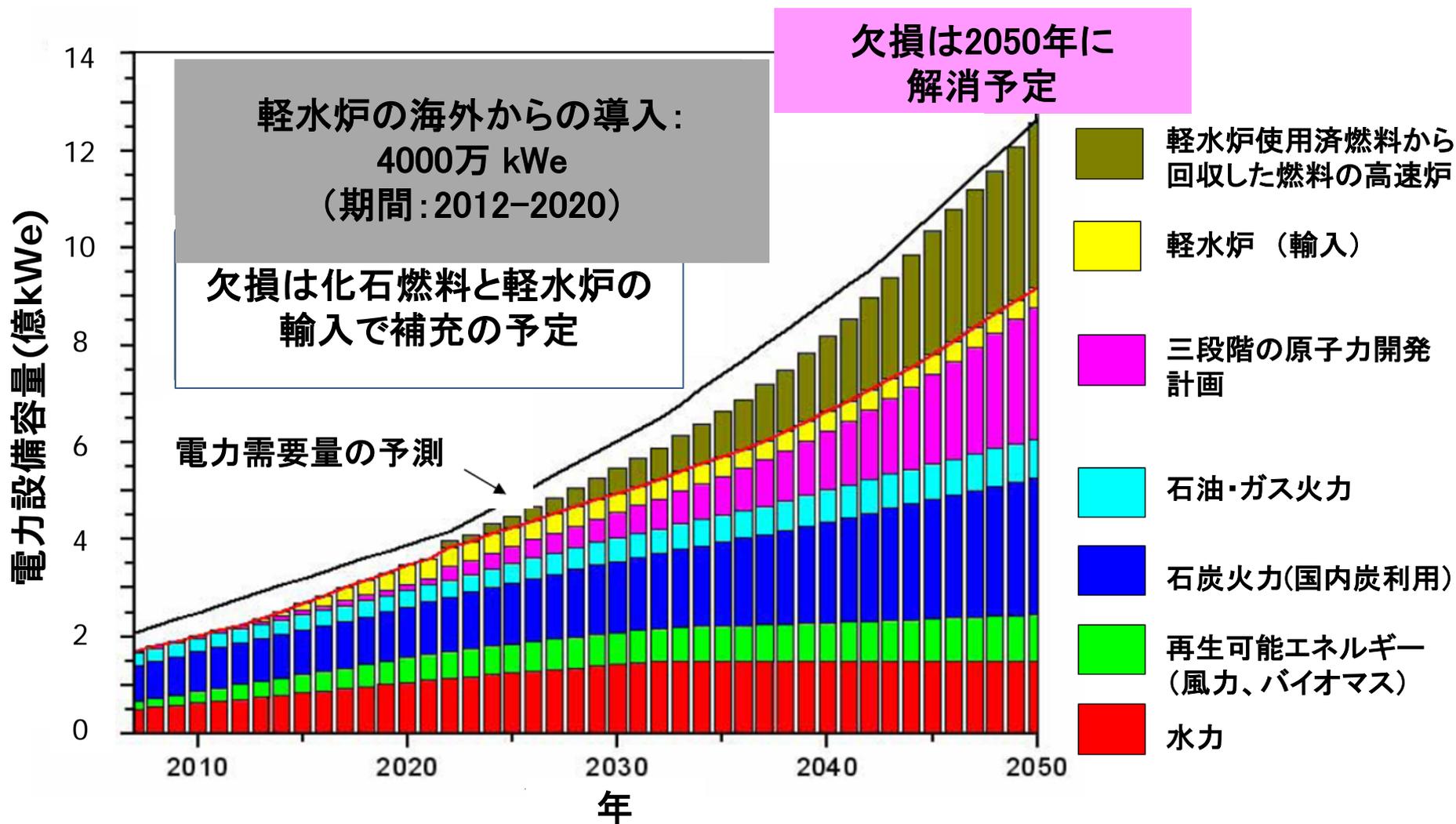
進化する燃料サイクル

(廃棄物の分離変換)



出典: S.A. バルドワジ、「インドの原子力開発プログラム」、第48回原産年次大会(2015年4月) (一部追記)

http://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/04/原産大会48th_シブ・アビラシュ・バルドワジ_fix.pdf



出典: A. Kakodkar, "Indian Nuclear Programme- Rationale and perspective," AEC, India (July 4, 2008).

Th-U-233燃料サイクルの本格導入時期？

→FBR, ADS, AHWR, MSR等と関連サイクル技術の今後の展開に依存

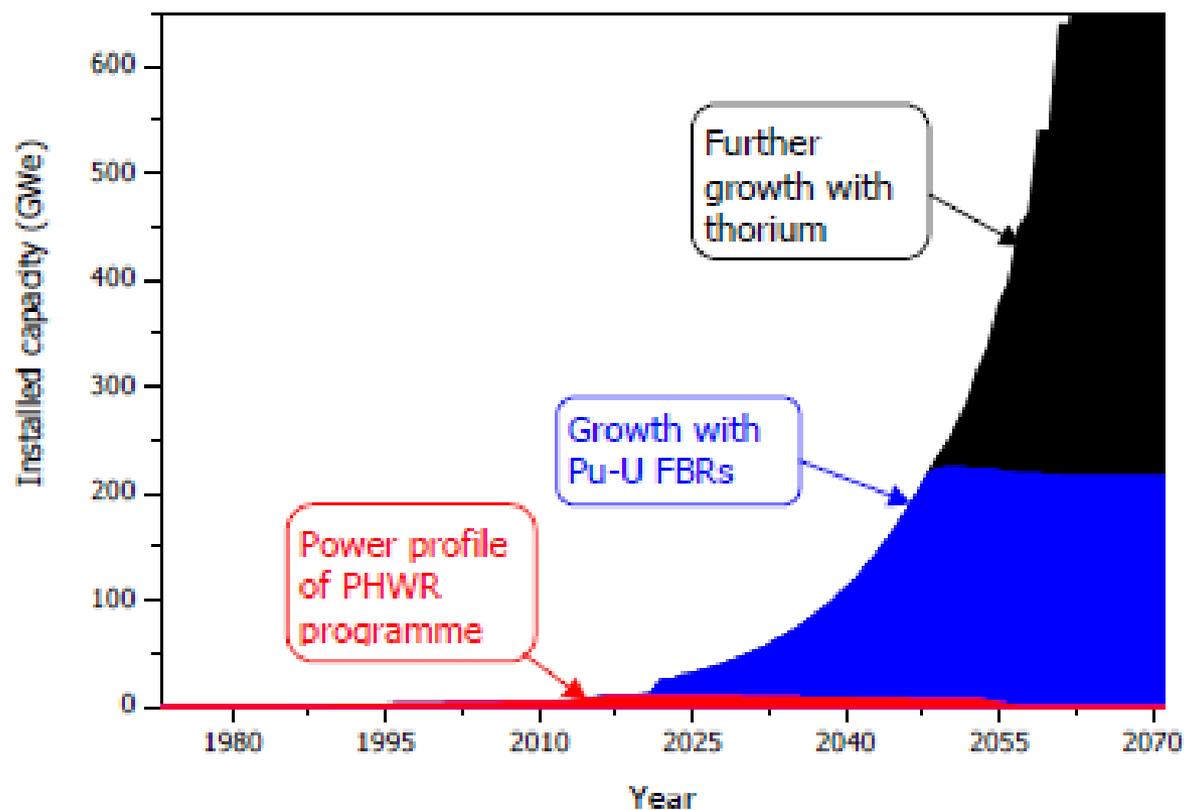


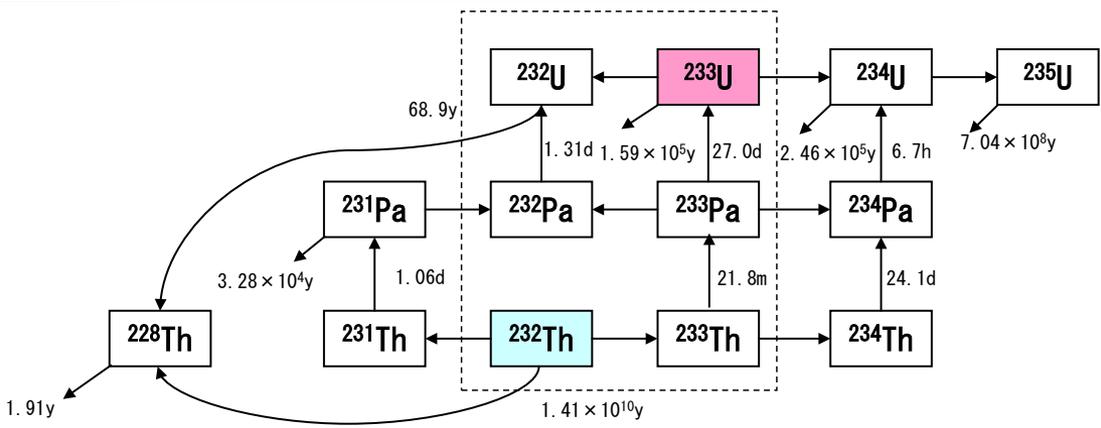
Figure 9: Optimum Strategy for thorium introduction in the third stage

出典: A. Kakodkar, "Indian Nuclear Programme- Rationale and perspective," AEC, India (July 4, 2008).

3. 原子炉と関連サイクルの 開発の現状と今後の計画

3.3 バーバ原子力研究センター(BARC)を中心とした 第三段階の原子力開発 (新型重水炉(AHWR)等の開発)

- 原子力の基礎から応用までの広範囲の先進的な研究開発*を実施するために、1957年に設置、1967年に現名称に改名。
 - *原子炉工学、原子炉安全、核燃料、計装・制御、材料科学、再処理、燃料製造、放射性廃棄物管理、放射線利用、新型重水炉、水素製造、海水の淡水化の開発、高経年変化対策、供用期間中検査、放射線を用いた食品処理、医療用・産業用同位体製造、環境技術、コンピュータシミュレーション、原子力開発のための人材供給など
- 職員数：15,190人（その内、科学者・技術者・幹部は4,630人）
- U-(Pu)-Th燃料を用いた新型重水炉(AHWR)、小型高温炉、加速器駆動未臨界増殖炉の開発や、トリウムサイクル等の開発
- FBTRの混合炭化物燃料を製造
- タラプールにあるBARCの先進燃料製造施設(AFFF)で、FBTRの試験用MOX燃料、及びPFBRの初期の数炉心分のMOX燃料を製造
- 研究炉ドルーバ(100MWt)を運転中、研究炉アプサラ(1MWt)を改造中
- BARCのトレーニングシステムが各研究所等に完備されており、毎年200～250人、2013年までに約8,300人を越える原子力技術者を教育・輩出



中性子吸収当りに核分裂によって発生する中性子数

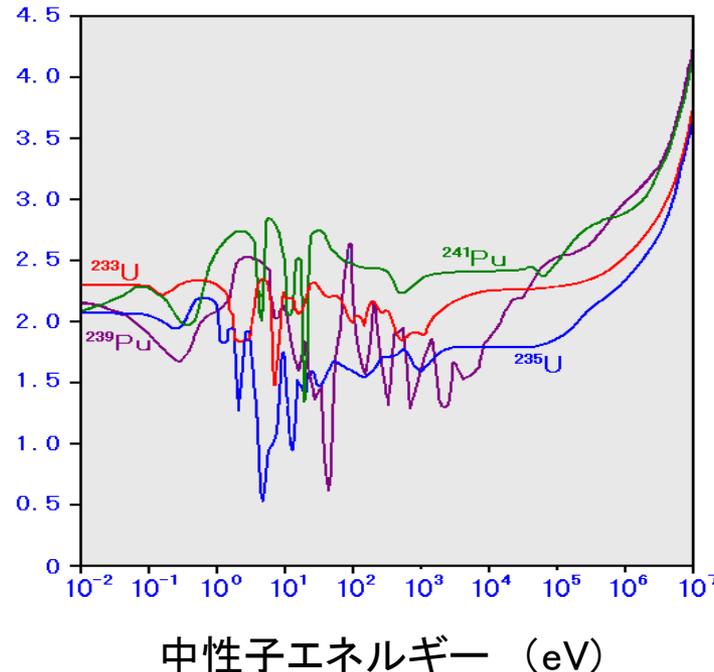


図1 233U, 235U, 239Pu および 241Pu の $\eta(E)$

○Th-232の中性子吸収(n,γ)によって核分裂性のU-233を生成

○U-233の中性子吸収当りに核分裂によって発生する中性子数(η)は、熱中性子領域で2.28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。**

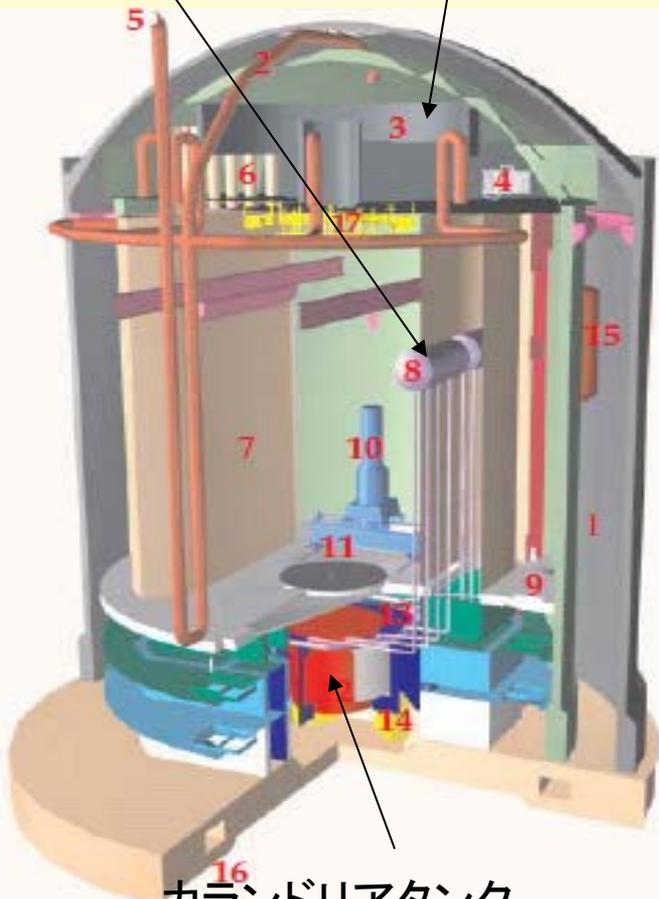
●一方、Th-232及びU-233の(n,2n)反応によって**U-232**も生成し、その娘核にTl-208のような高エネルギーγ線放出核種がある。→ **回収Uは高放射能； 燃料取扱上の課題**

[出典] J. J. Duderstad, L. J. Hamilton : Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons (1976), p. 69

新型重水炉 (AHWR)

水プール(重力落下)

蒸気ドラム



カランドリアタンク

(内径7.4m × 高さ5.3m)

電気/熱出力: 300MWe / 920 MWt
 燃料: U-233/Th-MOX + Pu-239/Th-MOX
 燃料チャンネル数: 452 (縦置き)
 炉心高さ: 3.5m
 冷却材: 沸騰軽水(自然循環) 受動安全性を考慮
 減速材: 重水
 設計寿命: 100年(冷却材管が交換可能な設計)

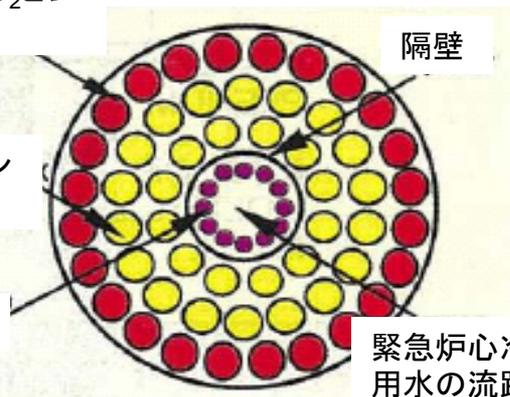
○原子力規制委員会による安全審査前の設計
 安全評価(プレヒア)を終了

○2017年までに建設開始予定

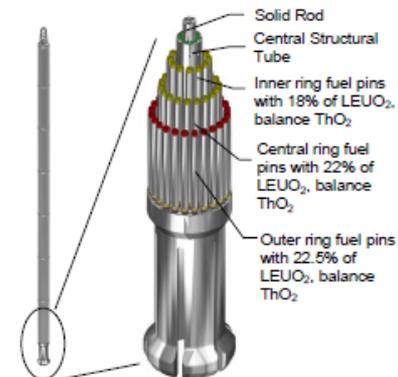
(Th,Pu) O_2 ピン
 24本

(Th,U-233) O_2 ピン
 30本

Zr O_2 - 5%Dy $_2$ O $_3$



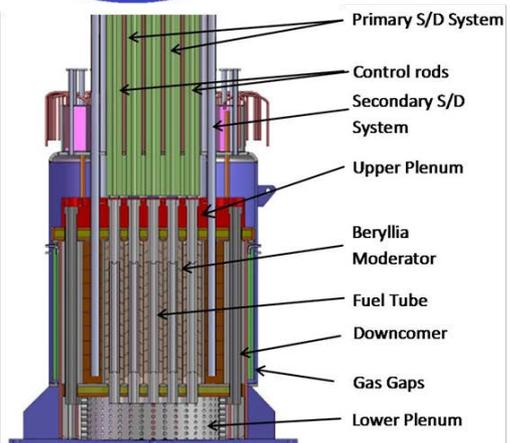
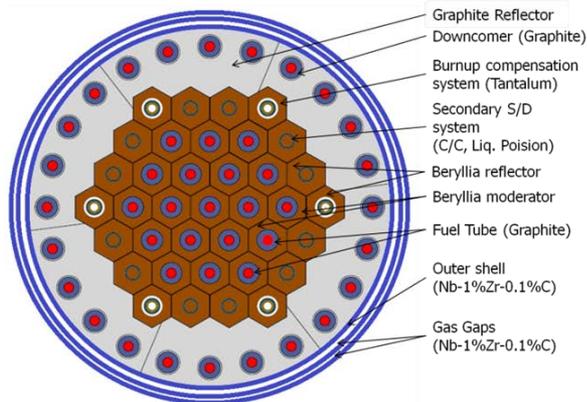
緊急炉心冷却
 用水の流路



燃料クラスター断面図(平衡炉心燃料)

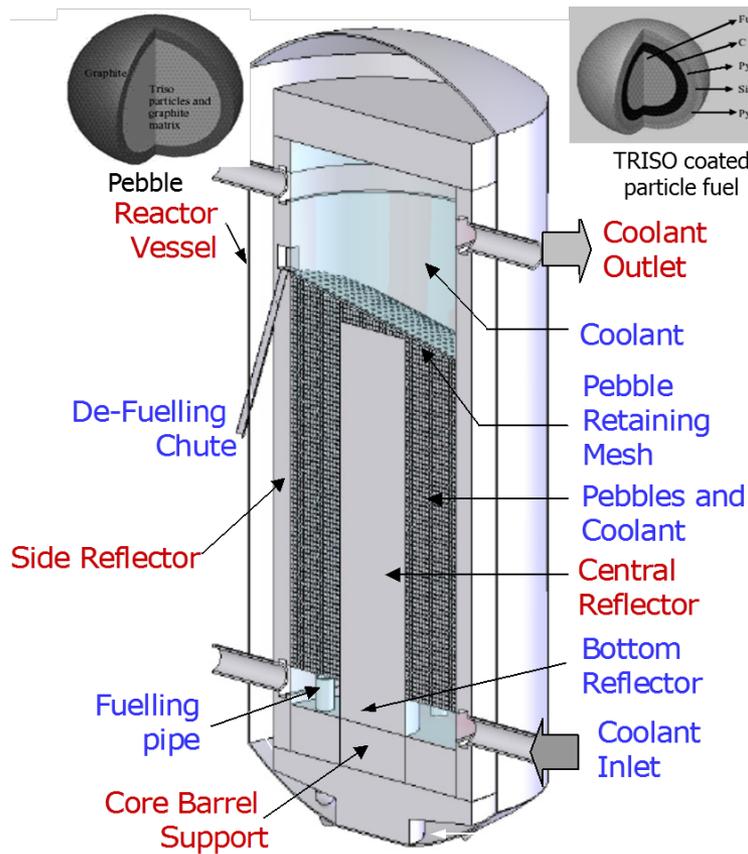
トリウム燃料利用のための革新炉の検討例

- 出力: 100kWt
- 炉心出口温度: 1,000°C
- 燃料: Th-U-233 被覆粒子燃料
- 冷却材: Pb/Pb-Bi、自然循環除熱
- 水素製造、高温熱源に利用



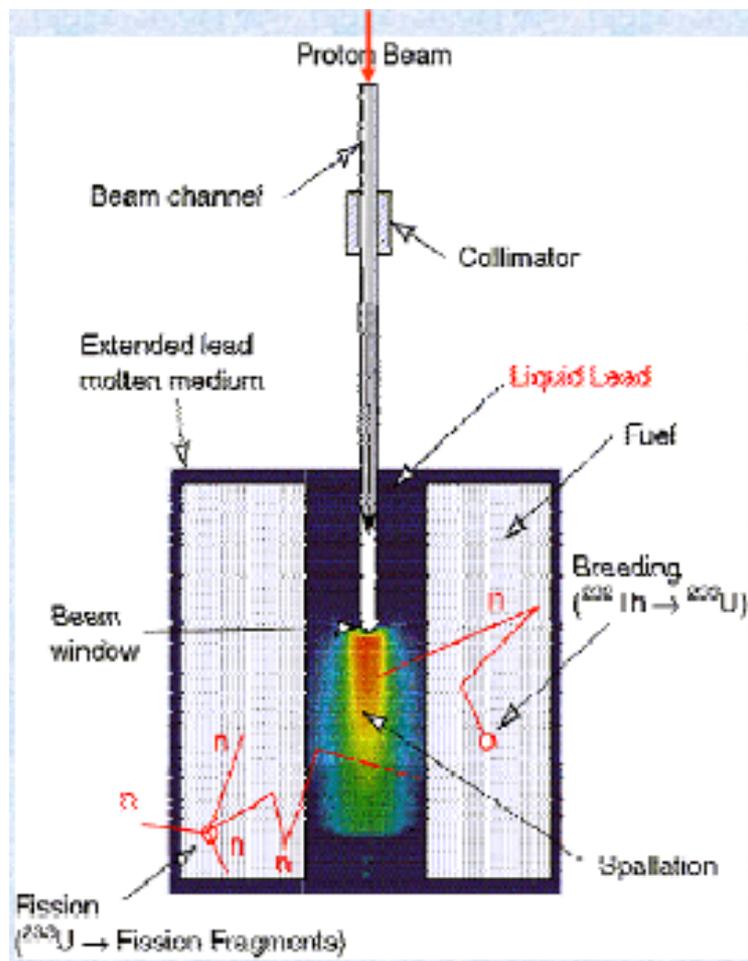
小型高温炉(CHTR)

- 出力: 60万kWt
- 炉心出口温度: 1,000°C
- 燃料: Th-U-233 被覆粒子燃料
- 冷却材: 熔融塩、自然循環除熱
- 水素製造、淡水化、高温熱源、に利用



革新的高温炉(IHTR)

- Th燃料の有効利用
- 長寿命放射性核種の消滅



加速器駆動の未臨界増殖炉

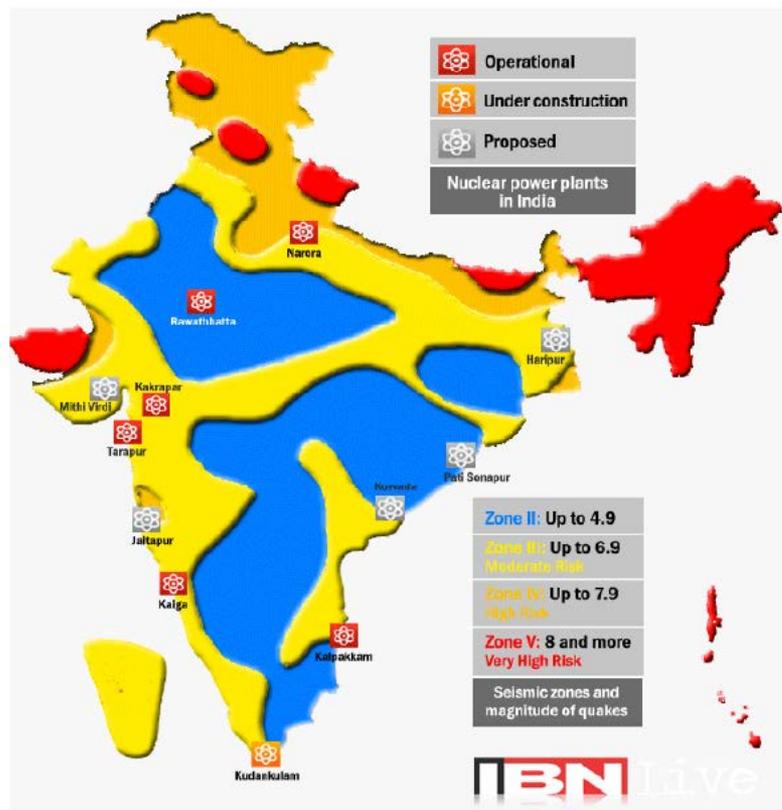
インドの研究炉

		アプサラ APSARA	サイラス CIRUS	ゼルリナ ZERLINA	ドルーバ DHRUVA	プルニマ I PURNIMA I	プルニマ II PURNIMA II	プルニマ III PURNIMA III	カミニ KAMINI
設置場所		BARC	BARC	BARC	BARC	BARC	BARC	BARC	IGCAR
炉型	スイミングプール	タンク	タンク	タンク	タンク	タンク	タンク	タンク	タンク
	熱中性子炉	熱中性子炉	熱中性子炉	熱中性子炉	熱中性子炉	高速炉	熱中性子炉	熱中性子炉	熱中性子炉
臨界		1956年8月	1960年7月	1961年1月	1985年8月	1972年5月	1984年5月	1990年11月	1996年10月
出力		1MW(最大)	40MW(最大)	100W(ノミナル)	100MW(最大)	1W(ノミナル)	10MW(ノミナル)	1W(最大)	30kW(ノミナル)
燃料	種類	濃縮U・アルミ合金	天然U	天然U	天然U	Pu酸化物	U-233	U-233	U-233
	形状	板状(金属)	棒状(金属)	棒状(金属)	クラスター(金属)	PuO ₂ ペレット	硝酸U溶液	板状(アルミ合金)	板状(アルミ合金)
	被覆材	アルミ合金	アルミ	アルミ	アルミ	ステンレス鋼	無し	アルミ	アルミ
	重量	4.5kg	10.5t	可変(初期炉心3.7t)	6.35t	21.6kg	400g	600g	600g
炉心サイズ(cm)		56*56*61.5(H)	276(D)*314(H)	229(D)*435(H)	372(D)*387(H)	18(D)*18(H)	13.7(D)*(25-40)(H)	20.4*20.4*27.5(H)	20.4*20.4*27.5(H)
中性子束密度 (n/cm ² /s)		1013	6.5*1013	5*108	1.8*1014	~109	108	~10 ⁸	~1013
減速材		軽水	重水	重水	重水	無し	軽水	軽水	軽水
冷却材		軽水	軽水	重水	重水	空気	軽水	軽水	軽水
制御棒		カドミウム	ホロンカドミウム	カドミウム	カドミウム	モリブデン	カドミウム/ 炭化硼素	カドミウム	カドミウム板
用途/備考		同位体製造、基礎研究、遮蔽実験等	同位体製造、原子炉技術のR&D、技術者訓練等	格子研究		高速炉の炉物理研究	U233燃料研究、将来炉の研究	KAMINI炉のモックアップ研究	
		アジアで最初の原子炉 2010年に運転を停止し、低濃縮ウランを用いた熱出力2MWtの炉に改造中	2004年11月に改修完了、フル出力運転再開 2010年12月に運転を停止	1983年に廃炉	基礎研究、同位体製造、技術者訓練、中性子検出器の試験等	1973年に廃炉	1986年に廃炉	(ベリリウム酸化物の反射材) 1991年に廃炉	自然循環で炉心冷却中性子ラジオグラフィ、検出器の校正、材料特性、遮蔽実験、サンプルの照射研究

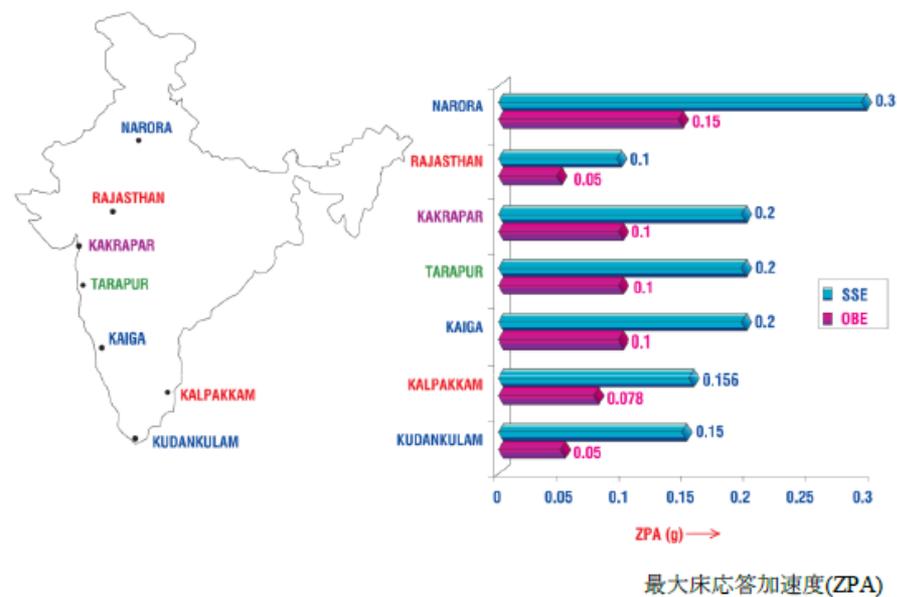
東電福島第一原子力発電所事故の影響

- 東電福島第一原子力発電所事故直後にインド政府は、国内で稼働中の原子力発電所の安全性の再確認(安全審査委員会を設置、IAEAの専門家の招聘等)の実施、安全規制の一層の厳格化(AERBを内包した独立の規制当局の創設等)を指示
- 安全確保とセキュリティに十分配慮して、より透明性を高めて原子力を推進していくというインド政府の姿勢は、東電福島事故後も不動
- インドでは、想定される地震のエネルギーの大きさ(マグニチュードM)で、国内を5領域(ゾーンI~V)に区分しており、ゾーンV(M8以上)への原子炉設置は禁止
- 運転中のプラントに対して、NPCILとAERBによる定期安全レビューを実施
- 1993年3月のナローラ原子力発電所での火災による17時間の外部電源喪失(SBO)事故や、2004年12月のインドネシア沖地震によるマドラス原子力発電所での津波被害についての教訓が反映され、各発電所では必要な対策を実施済み
- 東電福島事故後に、運転中の20基と建設中の6基に対して安全レビューを実施。その結果、地震、洪水、津波等の外部事象に対しては、更なる安全性強化のために、非常時の冷却水供給ルートの確保、可搬式ポンプや非常用ディーゼル発電機(DG)の整備、格納容器内の水素対策、緊急時対策手順書の整備等の対策を要請
- 建設中のPFBRについても安全レビューが行われたが、工事中にインドネシア沖地震(2004年)による津波の被害を受け、海拔5.1mの津波壁等の対策済み。福島事故を踏まえ、津波壁を9mへかさ上げ、床面高さを海拔9.6mに、またドアや配管・ケーブル貫通部等に海水侵入防止の対策工事を実施。さらに、SBOに備えて4台のDGが設置されているが、更に2台の可動式DGを準備

India: Nuclear and seismological map



安全停止地震 safe shutdown earthquake (SSE);
 運転基準地震 operating basis earthquake (OBE)



Evolution of seismic design basis for Indian nuclear power plants

- 1957年に、原子力の専門家を育成するためのトレーニングスクールをBARC(ムンバイ)に設置。
- 2000年以降、BARCトレーニングスクールを、IGCAR、ラジャ・ラマンナ先端技術センター(RRCAT)、核燃料コンプレックス(NFC)、原子力鉱物探査研究所(AMD)の4カ所にも設置
- BARCトレーニングスクールでは、全国の大学卒業生を選抜し、1年間、厳しく教育してインドの原子力界に毎年200～250人の優秀な人材を提供してきており、2013年までに8300人が卒業している。
- 2005年に、修士号や博士号を持った原子力の専門家を育成するためにホミ・バーバ国立研究所(HBNI)が設立させ、現在1200名を超える大学院生が在籍
- NPCILでは、運転員の教育訓練をNPCILの各サイト、BARCトレーニングスクール、WANOTトレーニングセンターを利用して行うとともに、職場内訓練(OJT)を行っている。
- 2017年に完成予定の世界原子力パートナーシップセンター(GCNEP)には、先進原子力システム、核セキュリティ、放射線安全、原子力材料、放射性同位元素(RI)・放射線技術の応用の5学部が設置され、国際協力も進め、国際的に通用する原子力の人材育成を図る予定。

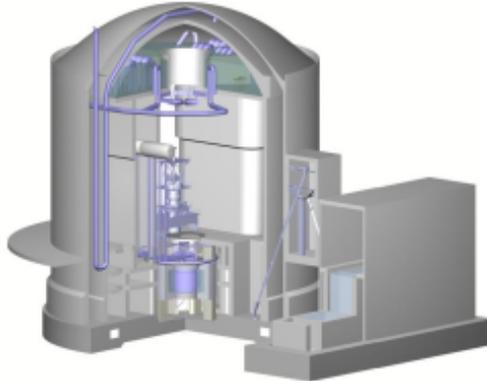
まとめ

- インドは、FBRを用いたクローズド燃料サイクルの早期実用化を目指して、原子力開発を最も積極的に進めている国の一つであり、優秀な研究者も非常に多いと推測されるが、これまでの我が国との原子力協力は限定的。
- 2013年9月、日印原子力学会の協力覚書(MOU)を締結
- 日印政府間の原子力協力協定の締結に向けて協議中
- 世界の多くの国が今後も原子力の利用・拡大を図ろうとしている中で、東電福島第一原子力発電所事故を起こした当事国である日本は、その経験と教訓を国際的に共有し、世界の原子力の安全性向上に貢献することが求められている。
- 2度の原爆の悲劇を受けた中で原子力の平和利用に徹してきた日本だからこそ、NPT未加盟であるインドに対して核不拡散を強く求めつつ原子力協力を進めることができ、これらの協力を通じて信頼関係を醸成できれば、世界平和にも貢献できる。

参考資料

Indian Advanced Heavy Water Reactor (AHWR-Pu)

AHWR is a 300 MWe vertical pressure tube type, boiling light water cooled and heavy water moderated reactor using ^{233}U -Th MOX and Pu-Th MOX fuel.

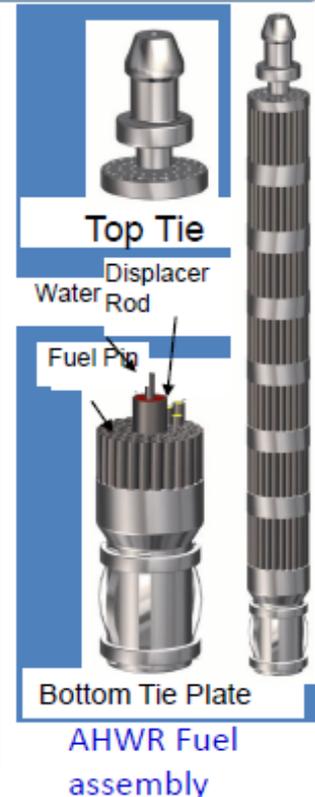


Design validation through extensive experimental programme.

Pre-licensing safety appraisal by AERB

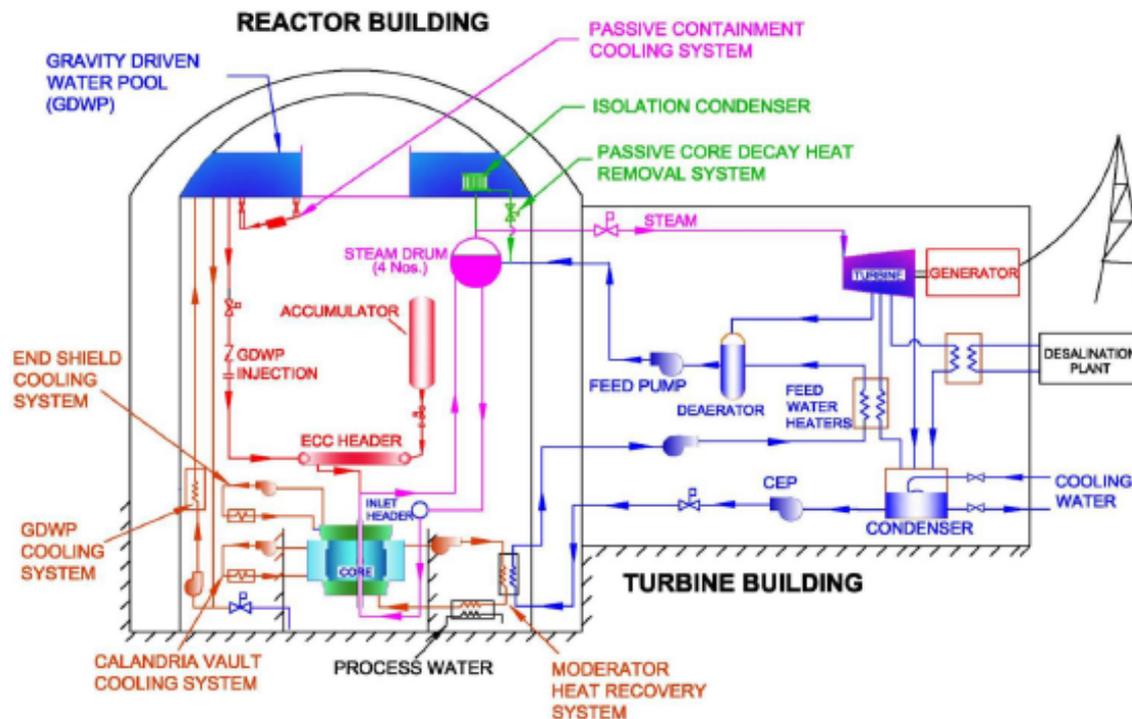
Site selection in progress.

- Major design objectives
- 65% of power from Th
 - Void Coefficient negative
 - Several passive features
 - 10 days grace period
 - No radiological impact
 - Additional Passive shutdown system
 - Design life of 100 years.
 - Easily replaceable coolant channels.



AHWR-Pu is a Technology demonstrator for the closed thorium fuel cycle 29

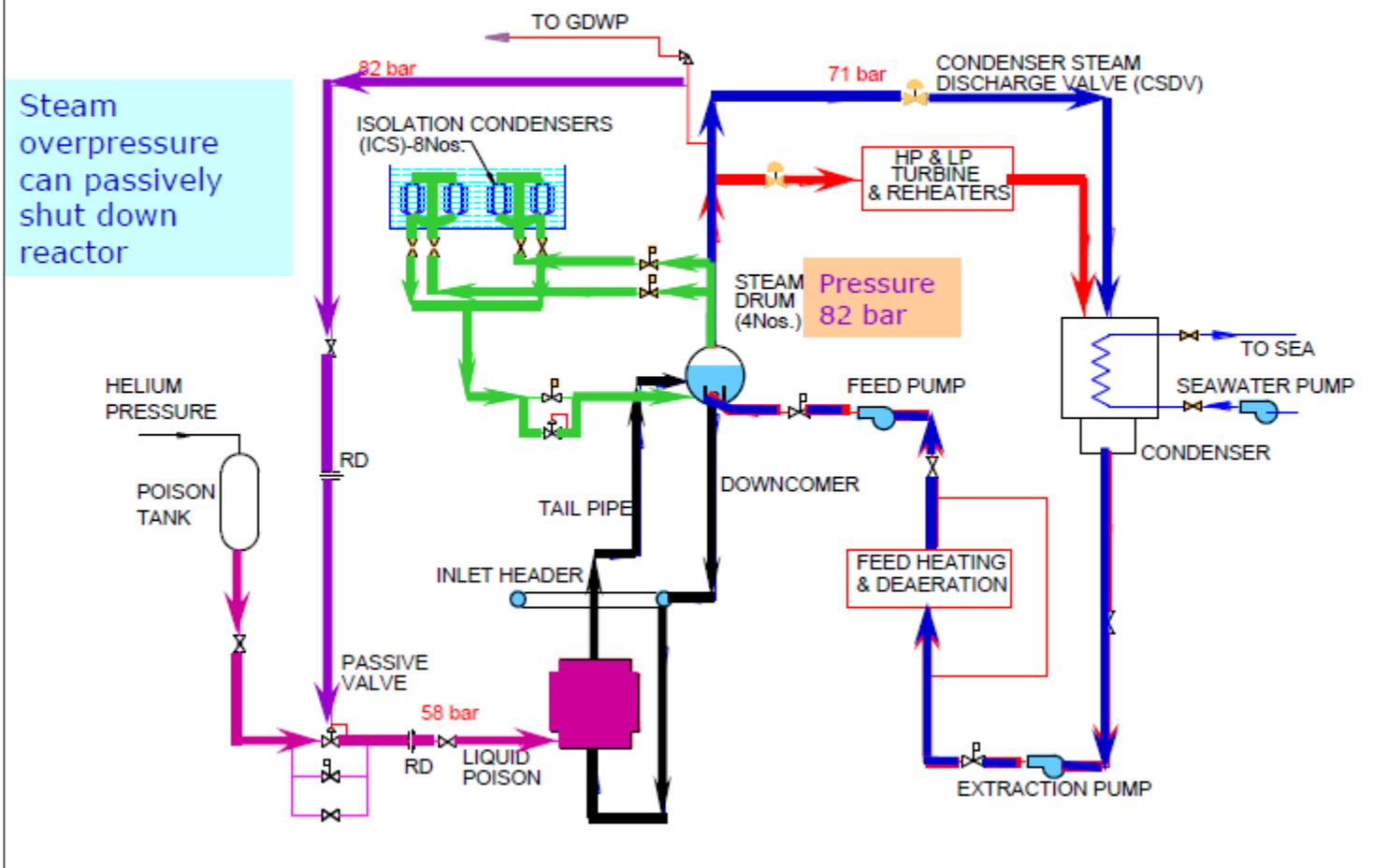
Passive Features of AHWR



- Passive core cooling by natural circulation
- Passive decay heat Removal by Isolation Condensers
- Passive shutdown system
- Passive ECCS injection by Accumulators & GDWP
- Passive Containment Coolers

30

Heat Removal Paths under Normal Operation & Shut down Condition and Passive Shut-down System



出典: S. Banerjee, "Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR) Technology-It's relevance today," WB. Lewis Lecture, PBNC, Vancouver, Canada (Aug. 25, 2014)