

主要国の核燃料サイクル完結に向けた開発動向

2021年7月 元核燃料サイクル開発機構理事 河田東海夫

2021年1月時点の設備容量でみた五大原子力大国は米国、フランス、中国、日本、ロシアであるが、資源の豊かさで別格の米国を除く4カ国（総設備容量は米国の1.8倍になる）はすべて再処理政策をとっており、長期的にはFBRサイクルを目指している（図1）。大規模原子力利用の持続可能性を資源利用と廃棄物負担軽減の両面で保証する上で不可避の選択枝だからである。現時点では設備容量はまだ大きくないが、中国に次ぐ人口を擁するインドも上述4カ国と同様の道歩んでいる。

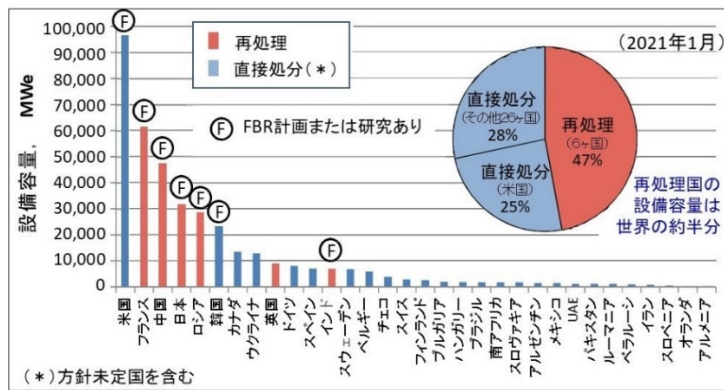


図1 各国の原子力発電設備容量と核燃料サイクル政策

ロシア

ロシアは、温暖化防止のパリ協定順守に向け、再生可能エネルギーと原子力のバランスの取れた利用を目指しているが、なかでも原子力は気候変動問題解決の決定打になりうるとして、その技術革新に向けた開発を精力的に続けている。その推進母体である国営原子力企業ロスアトムは2017年12月に「ロスアトムにとっての一番の優先事項は、高速中性子炉を基本とした閉じた核燃料サイクルの開発である」との見解を表明している。現在、高速増殖炉（FBR）開発ではロシアは世界をリードしているが、当面は軽水炉主流の時代が続くので、核燃料サイクルに関しては、軽水炉でのプルトニウム再利用と、FBRでの完全リサイクルの二段構造の核燃料サイクルの体系整備を目指している。この分野では、ロスアトム傘下で以下のようなきわめて意欲的な開発が進められている。

- FBRに関しては原型炉 BN-600（最近2025年までの寿命延長が決まった）の約40年にわたる運転実績を踏まえ、実証炉 BN-800 を建設して2016年11月から商業運転を行っており、さらに BN-1200 の設計を進めている。
- 再処理に関しては、チェリヤビンスクのマヤーク産業合同の再処理工場 RT-1（2010年代に大幅な設備の改造・増強を行った）で、これまでに VVER-440 の使用済燃料

5,300 トンと BN-600 の使用済燃料（基本的に濃縮ウラン燃料、一部 MOX）500 トン以上を処理した。このほかに原潜・砕氷船などの船舶炉用燃料や各種研究炉燃料も処理し、総計は約 6,500 トンに上る。2017 年からは VVER-1000 燃料の処理も開始し、最近では BN-800 の MOX 使用済燃料の受け入れも開始した（図 1）。

- クラスノヤルスクの鉍業化学コンビナート（MCC）には、RBMK-1000 と VVER-1000 向けの集中使用済燃料貯蔵施設（総貯蔵能力 3 万トン超）があり、VVER-1000 及び FBR 向けの大型再処理施設 RT-2 の建設が計画されている。その建設に先立ち、先進再処理技術の開発実証を行うパイロット実証センター（PDC）が建設され、2015 年から一部供用が開始され、開発実証試験が始まっている（図 2，3）。RT-2 の設計・建設にはその成果を反映する。また、MOX 燃料工場（メインの工程はホットセル方式）も建設され、2014 年から試験生産を開始し、現在は BN-800 の 2022 年フル MOX 炉心化に向けて本格生産を進めている（図 4）。閉サイクルの運営上、MA の存在の影響は無視できないが、サイクル全体への負担軽減の観点から、MA を専用の溶融塩炉（MSR、固体燃料としての加工・取扱い工程が不要になる）で燃焼させる構想があり、そのための MSR 実証炉建設に向け予備設計が進められている。
- トムスクのシベリア化学コンビナート（SCC）では、「ブレイクスルー（PROPYV）プロジェクト」として、鉛冷却高速炉 BREST-300（2021 年 6 月着工、2026 年運開目標）、U-Pu 混合窒化物燃料（MNUP）製造施設（2023 年竣工予定）、再処理施設（2024 年竣工予定）から成る、「パイロット実証エネルギー複合施設（PDEC）」の建設・運転による革新的高速炉サイクルの実証計画が進められている（図 5，6，7）。
- 軽水炉での Pu 多重リサイクルを可能とする REMIX 法という技術の実用化開発が進められている。軽水炉燃料再処理で回収される U, Pu の全量を再混合し（将来は非分離回収）、中濃縮ウラン添加で反応度不足を補うことで、Pu 全量の軽水炉での多重リサイクルを可能とする方式である。この場合、燃料中の Pu フィッサイル濃度は 1% 前後（いわゆる MOX 燃料に比べの数分の一）になり、U 2 3 5 濃度は 4% 程度が必要とされる。2016 年からバラコヴォ原発で 3 体の REMIX 燃料の燃焼実証試験が行われている。VVER-1000 での本格利用に向けた安全評価書作成も開始されており、産業規模の REMIX 燃料工場を MCC に建設する計画も動き出している。
- 高レベル廃棄物の最終処分に関しては、MCC から数 km 南のニジニカンスキー花崗岩地帯で地下研究施設の建設計画が進められている（2025 年頃完成見込み）。



図1 マヤーク産業合同の施設群



図2 MCC の使用済燃料貯蔵施設群と PDC



図3 PDC 完成予想図

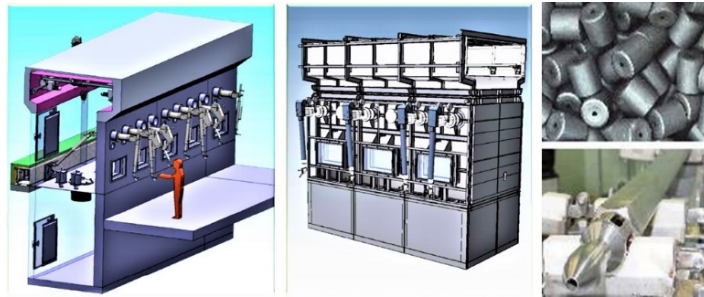


図4 MMC の MOX 燃料工場のホットセル式製造設備

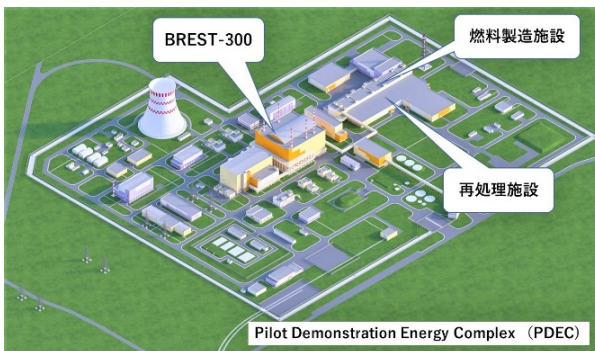


図5 SCC の PDEC



図6 建設が進む PDEC の燃料製造施設



図7 PDEC での BREST-300 着工式(2021 年 6 月 24 日)

フランス

フランスでは、ウラン使用済燃料の全量再処理と MOX 燃料としての回収 Pu の全量リサイクル(ただし 1 回利用)の体制が完備しており(回収ウランの再濃縮利用も行っている)、軽水炉核燃料サイクルのインフラ整備は世界で最も進んでいる(図 8)。2015 年発効の「エネルギー転換法」に基づいて策定された「エネルギー多年度計画」(PPE, 2020 年 4 月に最終版公表)で、石炭火力の廃止や再エネ利用拡大の方針が示され、発電における原子力比(これまでは約 70%)は 2035 年までに 50%までに引き下げることとなった。こうした政策変更の中で、FBR 実証炉 ASTRID 計画は停止となったが、再処理・リサイクル路線は堅持され、長期的取り組みとして高速炉によるサイクル完結に向けた研究開発は継続される。

これまでフランスでは、当面軽水炉で一回リサイクル型の Pu 利用を進めつつ、今世紀中ごろから段階的に高速炉を導入して多重リサイクル(サイクルの完結)に移行するシナリオを描いてきたが、PPE の下では、高速炉導入の前に、軽水炉(EPR)での Pu 多重リサイクルのフェーズを入れるという軌道修正を行った(図 9)。フランスで検討されている軽水炉 Pu 多重リサイクルは、Pu の品位劣化による反応度不足をウラン濃縮度の調整で補う点はロシアの REMIX と同じであるが、Pu 富化度が相対的に高い MOX 燃料を使用する点が異なる。集合体中心部に MOX 燃料棒(Pu 富化度は 3 段階あり、中心部ほど高い)を配置し、外周部に濃縮度をやや高め(ただし 5%以下)に調整したウラン燃料棒を配置した集合体を使用する CORAIL 法と、濃縮度調整をしたウランと Pu から成る均一組成の MOX 燃料棒で構成される集合体を使用する MIX 法の二つの方式を検討している。

こうした政策変更の下、短期的取り組みとしては、これまで MOX 燃焼の主役となっていた 900MWe 級 PWR 14 基が原子力比低減方針で停止されるため、2020 年代後半から 1,300We 級 PWR での MOX 燃焼を開始する。また MOX 使用済燃料と再濃縮回収ウランの使用済燃料の一定量の蓄積に対応するため、専用の集中貯蔵プールを 2030 年までに建設する。

中期的取り組みとしては、EPR での Pu 多重リサイクル技術の 2040 年頃からの実用化を目指し、先行実証照射試験を進めるほか、ラアーグに MOX 燃料再処理用の New head end industrial pilot(新型前処理実用化パイロット施設)を設置するための設計を進める。

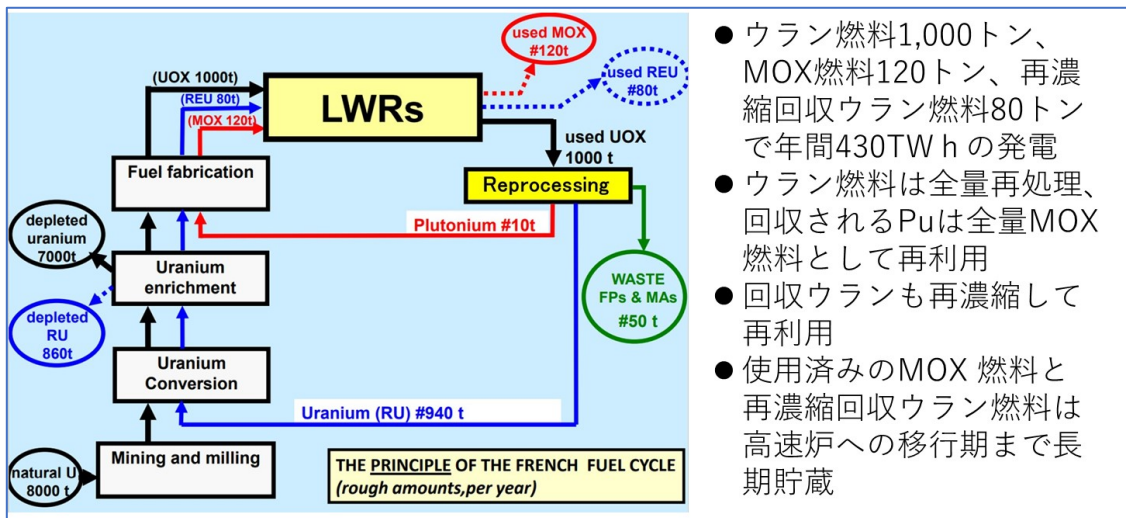


図8 フランスの現行軽水炉核燃料サイクルにおける年間マテリアルバランス

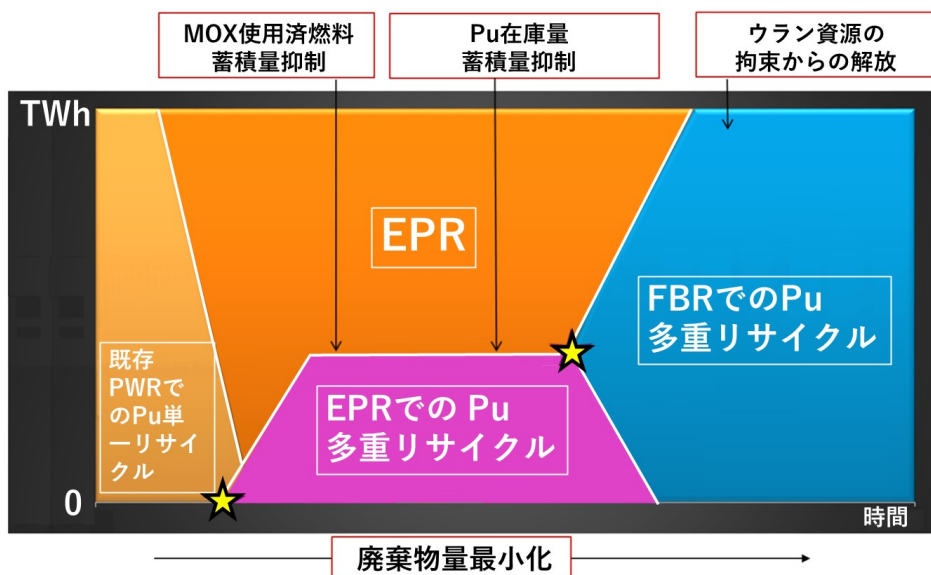


図9 フランスのサイクル完結に向けた3段階シナリオ

中国

中国の原子力発電は急速な発展を続けており、2021年5月時点では50基、48.5 GWeの設備容量に達し、米仏に次ぐ第3の原発大国となっている。中国は、大規模原子力利用の持続可能性を保証するために、長期的には高速炉による閉じた核燃料サイクルを目指すことを基本方針としており、図10に示すような開発ロードマップを描いている。

高速炉に関しては、北京郊外の中国原子能科学研究院（CIAE）に実験炉 CEFR（電気出力20万kW）を建設し、2014年末から全出力運転を開始している。その後原型炉 CFR-600（電気出力60万kW）の建設を福建省・霞浦で2017年末から開始している。

再処理に関しては、蘭州酒仙に年間処理能力 50 トンのパイロットプラントを建設し、2010 年からホット運転を開始している（図 1 1）。同プラントで回収される Pu は、近くに建設された MOX 燃料試験製造設備（図 1 2）で、CEFR での照射試験用 MOX 燃料製造に使用されている。小型の MOX 燃料製造プラントの建設も計画されており、2019 年に建設許可が下りている。また、急増する軽水炉使用済燃料排出に対応するために、フランスからの技術導入で年間処理能力 800 トンの大型再処理工場を建設する計画もあり、現在オラノ社との契約に向けた協議が進められている。

CIAE では、14 のホットセルと 50 のグローブボックスから成る大型研究開発施設「中国再処理放射化学研究所」(CRARL) が 2014 年に竣工し、2015 年から MA 分離を含む先進湿式プロセスや乾式再処理技術の本格的な開発試験が開始されている（図 1 3）。

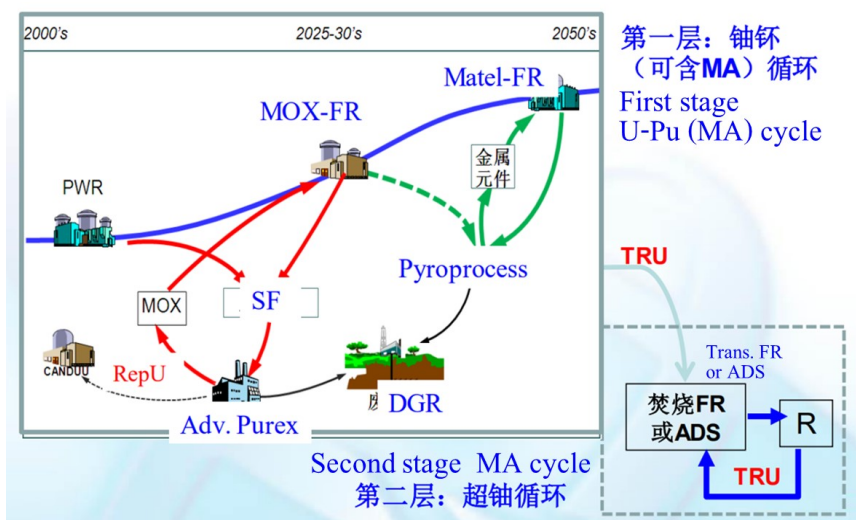


図10 中国のクローズドサイクル中長期開発戦略

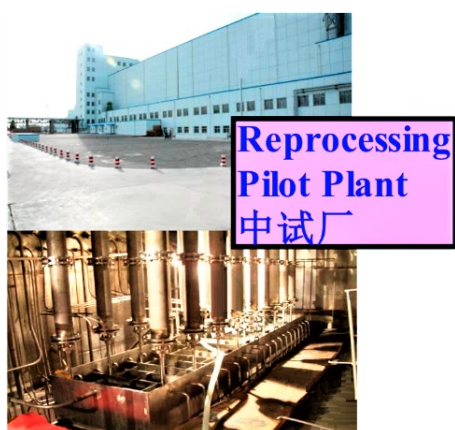


図11 再処理パイロットプラント



図12 MOX 燃料製造試験施設



図13 中国再処理放射化学研究所 (CRARL)

インド

インドは、豊富なトリウム資源を有するが、ウラン資源にはあまり恵まれていない。その一方で核不拡散条約 (NPT) 未加盟国のため、1970 年代末以降海外から原子力技術やウラン資源を自由に入手できなくなった。こうした特殊事情から、インドは、究極的には自国資源のトリウム利用で自立できる「トリウムサイクル」の確立を目指し、以下のように極めてユニークな 3 段階の原子力利用開発計画を進めている (図 14)。

第 1 段階： 国産加圧重水炉 (PHWR) と輸入軽水炉で発電するとともに、使用済燃料を再処理して Pu を生産する。

第 2 段階： FBR における U-Pu 多重リサイクル利用によって発電を行うとともに、ブランケットにトリウムを装荷して U233 を生産する。

第 3 段階： U233・トリウム混合燃料を増殖型の新型重水炉 (AHWR) で燃やして発電を行うとともに、トリウムから生まれる U233 を回収し、リサイクル利用する (トリウムサイクルの完成)。

インドの原子力開発の 2 大拠点は、ムンバイ、タラプール地区のバーバ原子力研究センター (BARC) とカルパッカムのインディラ・ガンジー原子力研究センター (IGCAR) であり、第 2 段階の FBR と関連サイクルの研究開発は IGCAR で集約的に進められている。また、AHWR など第 3 段階向けの開発は BARC で進められている。なお、2008 年 9 月に「原子力供給国グループ (NSG) ガイドライン」が修正され、翌月に米国との間で原子力協定が締結されたのを契機に、インドは多くの国との間で原子力協力協定を結ぶことができ、ウラン燃料の海外調達や海外炉導入への道が拓けた。こうして、クダンクラムにはロシアから導入された 2 基の VVER-1000 が建設され、2014 年と 2017 年に営業運転を開始し、現在さらに 2 基の同型炉の建設が進んでいる。

FBR に関しては、IGCAR で実験炉 FBTR (U-Pu 炭化物燃料、のちに外側炉心に MOX 燃料装荷) が 1985 年から稼働しており、MOX 燃料や、金属燃料の照射試験に使用されてきた。カルパッカムに PFBR (電気出力 50 万 kW) が建設され、2015 年から各系統の性能試験が行われているが、一部の機器に不具合が見つかったことなどから全体工程に遅れが見られ、2020 年 8 月時点の報道では、初臨界は 2021 年 12 月になると伝えられている。PFBR に隣接して、電気出力 60 万 kW の実用炉 2 基 (FBR1&2, ツインプラント) を 2020 年代後半運転開始を目指して建設する計画も進められている。

インドの原子力は、核燃料のリサイクル利用を大前提とした体系であるため、再処理技術の開発は早い段階から進められてきた。1964 年には研究炉用燃料向けの小型再処理施設がトロンベイで操業を開始し、今日ではタラプールで 2 基 (PREFERE-1 & 2)、カルパッカムで 1 基 (KARP) の発電炉用燃料再処理工場 (いずれも年間処理能力 100 t) が操業している。タラプールには先進燃料製造施設 (AFFF) が 1990 年より操業を開始しており、再処理で回収される Pu を用いて FBTR での照射試験用や PFBR 炉心装荷用の MOX 燃料の製造が行なわれている。

FBR 燃料の再処理に関しては、IGCAR の CORAL という小型の鉛遮蔽セルで 2003 年から再処理試験 (基本プロセスは Purex 法) を開始し、その成果をもとに PFBR の使用済燃料を用いたさらに実証的な再処理試験を行う DFRP を建設した。DFRP は 2019 年時点ではケミカルテストが進行中で、ウラン試験開始の準備が進められている (図 1 5)。さらに 2017 年からは、カルパッカムの PFBR と 2 基の実用炉 (FBR1&2) 用サイトの隣接地に、FBR 用の MOX 燃料製造、再処理、廃棄物処理を統合した高速炉燃料サイクル施設 FRFCF の建設を 2017 年に開始し、2022~2023 年の完成を目指している (図 1 6、1 7)。再処理施設は当面 PFBR の炉心およびブランケット燃料の処理に必要な 13 トン/年の処理能力を持つが、FBR1&2 が完成した段階では 50 トン/年まで処理能力を拡大できるとしている。基本プロセスは Purex 法であるが、MA 分離を含むプロセスの高度化や、使用機器についても遠心抽出機の開発など、先端的な技術開発に熱心に取り組んでいる。さらに、インドでは急増する電力需要に対応するため、将来的に増殖率がより高い金属燃料 FBR に移行することを計画しており、乾式再処理技術開発も精力的に進めている。

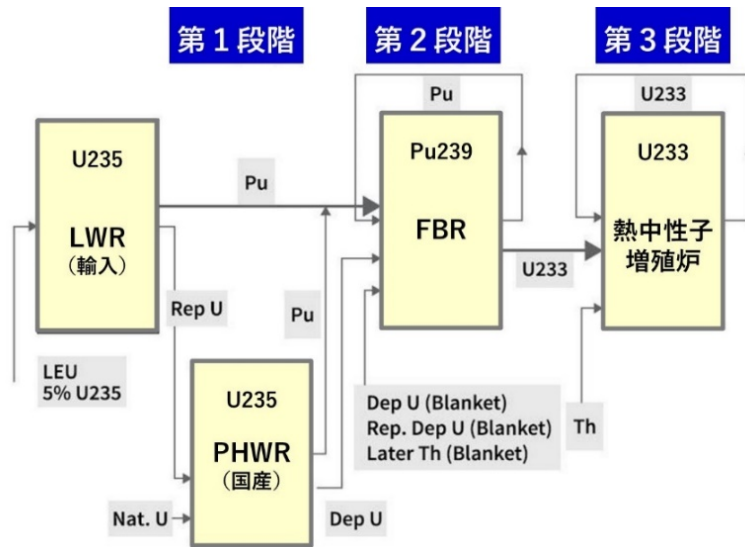


図14 インドの3段階原子力利用開発計画



燃料ピンせん断機

レーザー集合体解体機

8段型遠心抽出機

図15 DFRP で使用される主要再処理機器

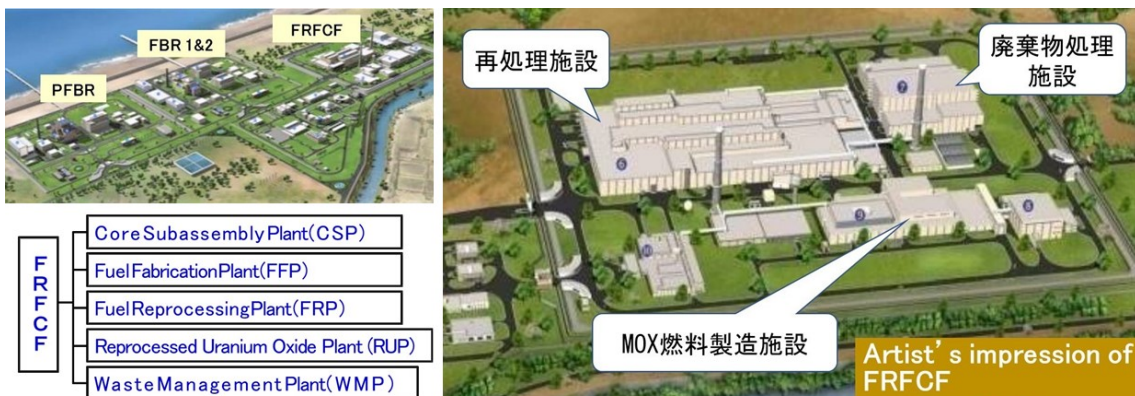


図16 カルパッカムに建設中の統合型高速炉燃料サイクル施設 FRFCF の概念図



図17 FRFCF の建設状況(2019 年)

参考文献

- 1) 下記 IAEA 国際会議の各国発表論文およびプレゼンテーション資料
 Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors、Proc. Of International
 Conf. Vienna, 24 – 28 June 2019
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1905_web.pdf
- (ロシア関係情報)
- 2) Rosatom Proposes Balanced Solution to Climate Change
<https://www.prnewswire.com/news-releases/rosatom-proposes-balanced-solution-to-climate-change-666996793.html>
- 3) Fast reactor fuel cycle for two-component nuclear power
[https://nucleus.iaea.org/sites/connect/SFMpublic/TM%20on%20Strategies%20%20Opportunities%20for%20the%20Management/Fast%20Reactor%20Fuel%20Cycle%20for%20Two-Component%20Nuclear%20Power%20by%20Dr.%20Shadrin%20\(Russian%20Federation\).pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/connect/SFMpublic/TM%20on%20Strategies%20%20Opportunities%20for%20the%20Management/Fast%20Reactor%20Fuel%20Cycle%20for%20Two-Component%20Nuclear%20Power%20by%20Dr.%20Shadrin%20(Russian%20Federation).pdf)
- 4) Breakthrough Project
<https://www.tvel.ru/en/activities/proryv-project/>
- 5) PROJECT <PRORYV>
http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/Materials_2016/Plenar_en/PROJECT_PRORYV_.pdf
- (インド関係情報)
- 6) Indira Gandhi Centre for Atomic Research Annual Report – 2019
<http://www.igcar.gov.in/igc2004/igcanr2019.pdf>
- 7) Fast Reactor Fuel Cycle Facility to be ready by 2022-23
<https://www.outlookindia.com/newscroll/fast-reactor-fuel-cycle-facility-to-be-ready-by-202223/1819236>
- 8) Now, December 2021 - India's Prototype Fast Breeder Reactor [PFBR] To Go Critical
<https://www.spansen.com/2020/08/december-2021-india-prototype-fast-breeder-reactor-pfbr.html>