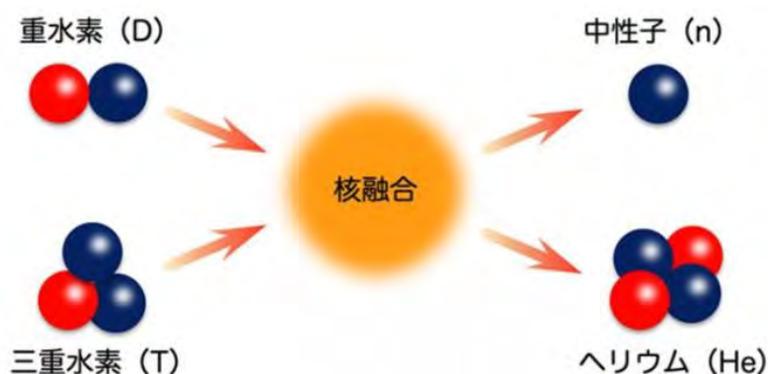
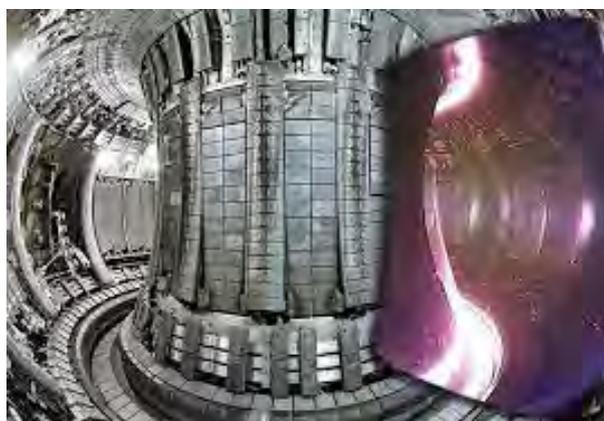


一を生み出すのと同じ仕組みであり、これによりこれまでのエネルギー技術では創り出すことができなかった非常に大きなエネルギーを創出させることができる。これは、原子炉内の温度を1.5億度(150 million °C)という超高音にまで上昇させ、物質をプラズマ化させることで、炉内にプラズマ状態を創り出し、核融合が人工的に起こさせることでエネルギーを創り出すというものである(図 6-4)²²⁹。この技術を実現させる過程で「プラズマ物理学」という新興学問が核融合研究と並行して発展し、核融合科学を超えた他分野でも革新的な知見を提供してきた。



(図 6-3 D-T 核融合反応²³⁰)



(図 6-4 原子炉内のプラズマ²³¹)

²²⁹ Fusion for Energy, Delivering Fusion Energy. Retrieved from

<https://fusionforenergy.europa.eu/what-is-fusion/>

²³⁰ 漁師科学技術研究開発機構「誰でも分かる核融合のしくみ | 核融合とは?」(2021年10月1日更新)

<https://www.qst.go.jp/site/jt60/4930.html>

²³¹ ITER, Making it Work. Retrieved from <https://www.iter.org/in/sci/makingitwork>

こうした核融合技術の国際的発展のために 1986 年にソ連を筆頭に米国、欧州連盟(EC)そして日本が参画する形で、「国際熱核融合実験炉」(ITER)の計画が始動した。これは冷戦真っ只中だった 1985 年にソ連のゴルバチョフ書記長と米国のレーガン大統領との間で「核の平和利用」のために行われた歴史的米ソ首脳会談「ジュネーヴ・サミット」(Geneva Superpower Summit)で交わされたアイデアであり、ソビエト連邦と西側諸国との対立構造を超えたこの歴史的枠組みの中で、核融合技術の国際的発展が進められることとなった²³²。しかしながら、ITER の設計計画は予想以上に年月を有することとなり、米国は徐々にこの ITER に対して消極的になってゆく。1990 年代半ばには共和党議員の大半が公共事業投資に難色を示したことから、ワシントン内部でも ITER への出資に批判的なムードが続いた²³³。結果的に米国の ITER への出資は全体の僅か 5%に留まり、他の参加国からの批判を浴びることとなる²³⁴。米国は 2001 年に ITER の最終的なデザインが参加国で合意された時点では ITER から脱退していたものの、2003 年には復帰し現在に至る。

このように、民主主義体制においては、国際的な研究開発プロジェクトの遂行において国内政治が国際的な枠組みに大きな影響を及ぼすことが多々ある。ITER のケースは原子力技術で世界をリードしてきた米国でさえもその国内政治の動向によって、国際的な技術協力へのコミットメントを弱めざるを得ないことの証左であり、トランプ政権後より一層国内政治が国際協調よりも優先される今日の米国政治を鑑みるに、21 世紀の国際技術協力においても大国の国内政治が及ぼす影響を考慮することは重要となるだろう。

4. 宇宙探索における原子力エネルギー技術の応用

原子力エネルギーは他のエネルギー技術が生み出すよりもはるかに大きなエネルギーを半永久的に作り出すことができる。こうしたことから、その技術応用は宇宙探索分野でも検討されてきた。2002 年に(NASA)が宇宙探索技術への原子力技術の応用に関する検討を開始、NASA は米国の国立研究会議(National Research Council: NRC)に 2 つの課題を与えた。一つは、宇宙探索における原子力技術の利用において優先的に重要となる宇宙科学技術の特定すること。もう一

²³² ITER, The ITER History. <https://www.iter.org/proj/ITERHistory>

²³³ Michel Claessens, *ITER: The Giant Fusion Reactor: Bringing a Sun to Earth* (Springer Nature, 2020).

²³⁴ Malcolm W. Browne, Money Shortage Jeopardizes Fusion Reactor. *The New York Times* (20th May 1997). Retrieved from <https://www.nytimes.com/1997/05/20/science/money-shortage-jeopardizes-fusion-reactor.html>

つが、将来の原子力エネルギーを用いた宇宙ミッションにおける新興科学技術に関する提案である。これを受けて、10年調査(Decadal Survey)から優先的に技術投資がされるべき新興科学技術として「ラジオアイソトープ電源 (Radioisotope Power Systems: RPS)と NEP (Nuclear-Electric Propulsion)が位置付けられた²³⁵。ブッシュ政権下の2004年にこうした新たな宇宙探索計画が「プロメテウス計画」として策定され、宇宙探索をより広範囲にかつ効率的に進めるためのエネルギー開発が本格始動した。

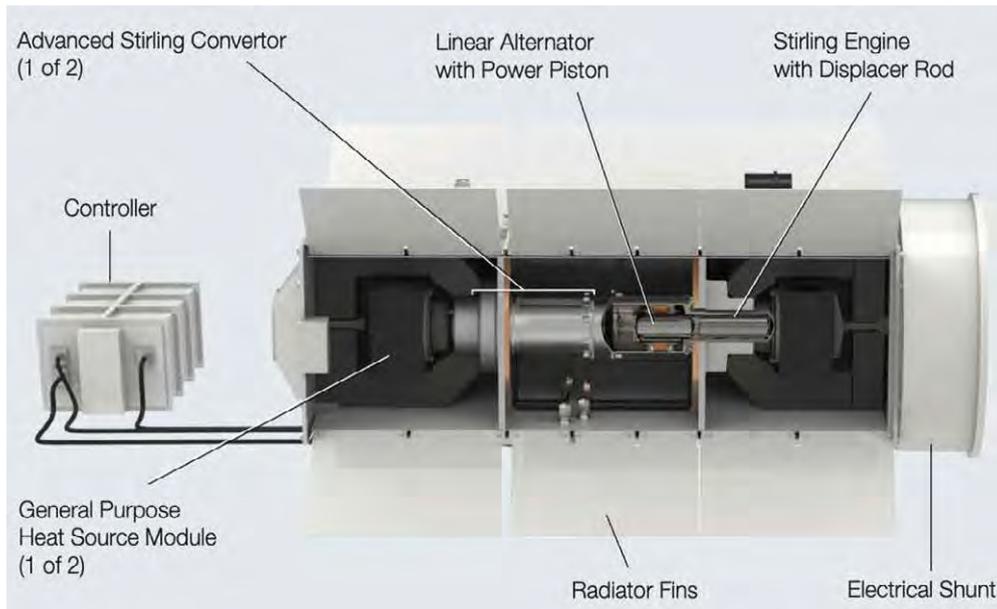
ラジオアイソトープ電源(RPS)

RPSはRTG(Radioisotope Thermoelectric Generator)の代表的電源システムであり、1961年にTransit IV-AにSNAP-3B7が初めて搭載されて打ち上げられて以来、特に米国において導入が進められてきた²³⁶。RPSは比較的低い電力や熱エネルギーを長期間にわたって生み出すのに適しており、コストが低いことでも宇宙探索に利用されてきた²³⁷。2000年以降は、NASAやエネルギー省を中心に、電池寿命等の信頼性を確保したまま、性能を向上させるとともに多様なミッションへの応用を可能にしたMM(Multi Mission)RTGやASRG(Advanced Stirling Radioisotope Generator)(図6-5)の研究開発が行われてきた。ASRGは火星のような他の惑星や真空の宇宙空間で稼働するように設計されており、今後も更なる小型化等が検討されている。

²³⁵ National Research Council, *Priorities in Space Science Enabled by Nuclear Power and Propulsion*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2006).

²³⁶ 星野健「宇宙探査とエネルギー 原子力エネルギー利用の歴史・現状・将来」『日本原子力学会誌』51巻3号(2009).

²³⁷ National Research Council, *Priorities in Space Science Enabled by Nuclear Power and Propulsion*.



(図 6-5 ASRG の構造²³⁸⁾)

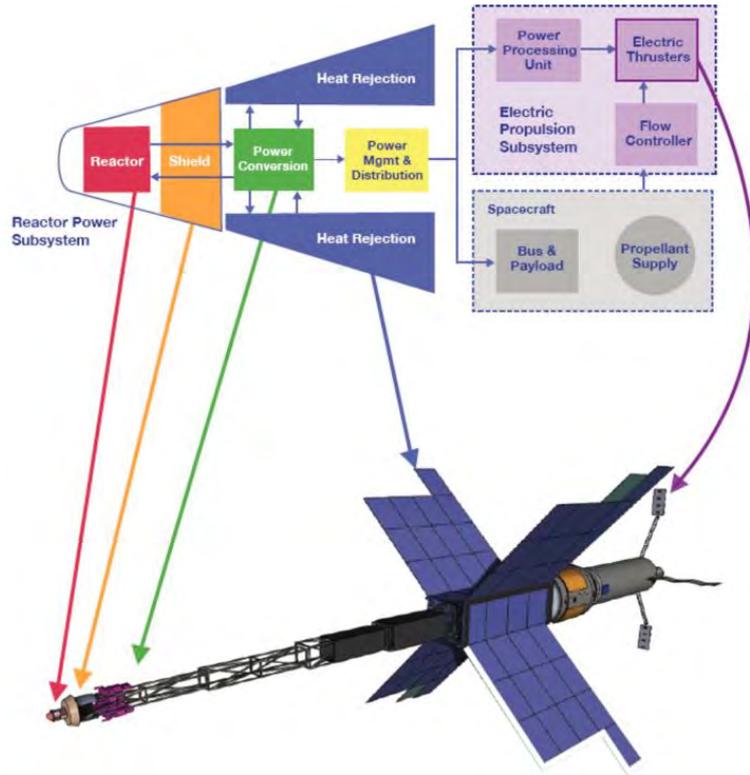
NEP

NEP 地上での原子力発電所のように炉内(Reactor)の核分裂(Fission)によって生じた熱を電力に変換する電源システムである(図 6-6)²³⁹。2004 年の「プロメテウス計画」では、太陽系の外縁部まで探索が可能となり、将来的に人類を地球以外の惑星に送り出すことを目標に、原子力を利用した推進エンジンを開発が始められた。例えば、電気出力 50-250 kWe, 比出力 25-35 kg/kWe で 10 年以上の寿命を有する NEP が木星の衛星を探索する JIMO(Jupiter Icy Moon Orbiter)計画への搭載を目指して開発される等、野心的な研究開発プロジェクトが開始した。しかし、JIMO 計画はその実現性と巨額の費用面から米国国内でも波紋を呼び、2005 年に一旦中止となり、原子力推進から月面等での原子力発電の検討に変更された²⁴⁰。NEP は RPS と比較して非常に大きなエネルギーを生み出すことができる一方で、そのコスト低減が課題とされてきた(図 7)。尚、プロメテウス計画以後の RPS 及び NEP の研究開発の展望について Appendix のフローチャートが参考になる。

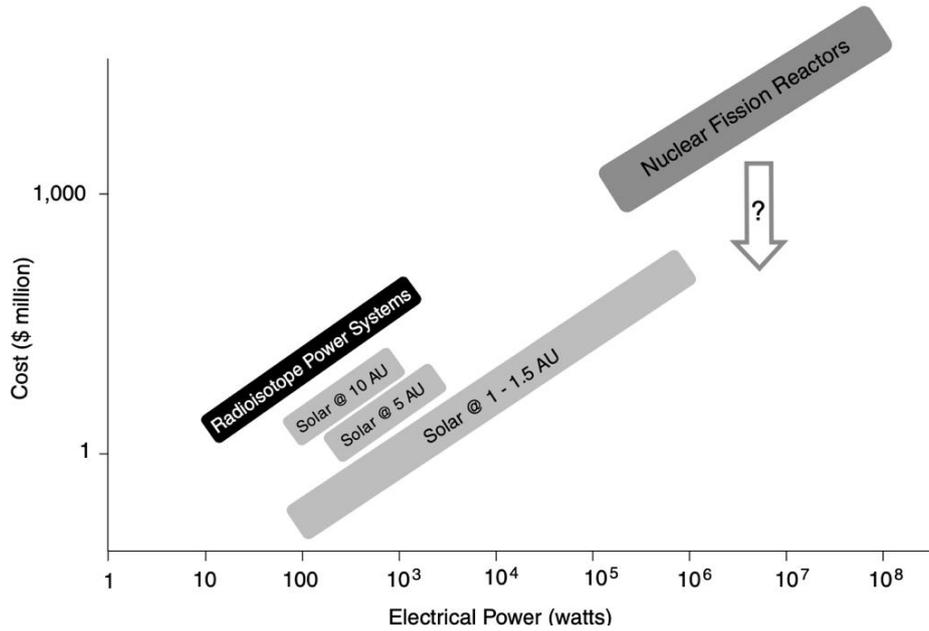
²³⁸ NASA, Advanced Stirling Radioisotope Generator (ASRG). Retrieved from <https://rps.nasa.gov/resources/65/archival-content-advanced-stirling-radioisotope-generator-asrg/>

²³⁹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2021).

²⁴⁰ The National Academy of Sciences, *Launching Science: Science Opportunities Provided by NASA's Constellation System*. (Washington, DC: The National Academies Press, 2009).



(図 6-6 NEP システムの仕組み²⁴¹⁾



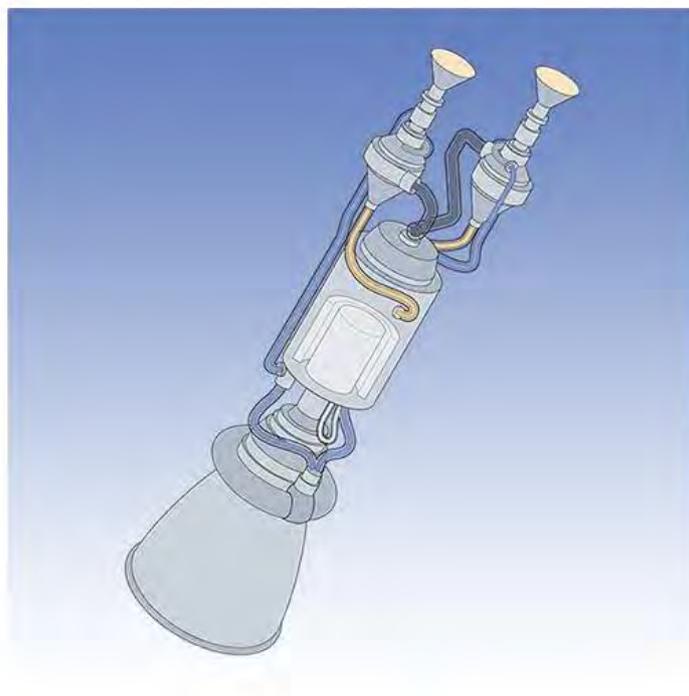
(図 6-7 RPS と NEP (Nuclear Fission Reactor) とのコスト及びエネルギーの比較²⁴²⁾

²⁴¹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration*. p. 31

²⁴² National Research Council, *Priorities in Space Science Enabled by Nuclear Power and Propulsion*. p. 10.

近年の研究開発動向

米国プロメテウス計画がその膨大なコスト要求から頓挫したものの、原子力エネルギーが宇宙探索技術に革新的な技術をもたらすという見解は IAEA でも近年再確認されている。特に、JIMO 計画で検討された NEP に加えて、同じく核分裂によってエネルギーを生み出す Nuclear Thermal Propulsion (NTP) も新興科学技術として注目されている(図 6-8)。NEP が核分裂で生じた熱を電力に変換するのに対して、NTP は核分裂で生じた熱をそのまま熱エネルギーとして動力に利用する。NEP に比較すると生成できるエネルギー量は少ないものの、NTP は従来の化学燃料と比較しても効率性が高く例えば火星までの到達時間が従来のエンジンよりも 25%短縮されると言われている²⁴³。



(図 6-8 Nuclear Thermal Propulsion (NTP) のイメージ)

²⁴³ IAEA, Nuclear Technology Set to Propel and Power Future Space Missions, IAEA Panel Says. (22nd February 2022) Retrieved from <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-technology-set-to-propel-and-power-future-space-missions-iaea-panel-says>; Department of Energy, 6 Things You Should Know About Nuclear Thermal Propulsion. (10th December 2021). Retrieved from <https://www.energy.gov/ne/articles/6-things-you-should-know-about-nuclear-thermal-propulsion>

また軍事技術領域においても、原子力エネルギーの宇宙探索への利用が盛んに議論されている。米国国防高等研究計画局(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)は、Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations (DRACO)プログラムを掲げ、地球と月を結ぶスペースクラフトの推進エンジンとして NTP の実装を進めてきた²⁴⁴。当該案件で DARPA は NTP が従来の推進エンジンが抱える推力重比率と推進燃料の効率性の問題を解決できると考えており、すでに General Atomics, Blue Origin そして Lockheed Martin の 3 社への発注を決めている²⁴⁵。2026 年度に NTP の実証を目標としており、安全保障的観点からも宇宙探索における技術開発競争が激化しつつあることがわかる²⁴⁶。

5. 中国の原子力発電技術

ここまで主に米国の事例を取り上げて、原子力エネルギー技術の発展について分析してきたが、中国も近年急速に原子力発電所の新設に着手しており、技術革新を進めている。こうした背景には化石燃料による大気汚染が深刻な社会問題となる中で、よりクリーンな原子力発電に舵を切ったことが背景にあるわけであるが、2000 年以降急激にその発電量を増やしていることが、図 6-9 から明らかである。また他国との比較においても 2021 年のデータでは米国に次いで世界 2 位の発電量を誇っており、欧米の先進国と比較しても膨大な電力を原子力発電で賄っていることがわかる(図 6-10)。このようにそのスケールから見ても、ここ 20 年で中国の原子力産業が急成長してきたことがわかる。研究者の在籍数を見ても中国科学院が世界一の研究者数を誇り、2 位のドイツのマックスプランク協会に大きく差をつけて 1300 人も研究者を抱えていることがわかる (図 6-11)²⁴⁷。一方で、所属機関国籍別シェアを見ると、日本、米国、中国の順に多く、日本の研究者もそれなりにプレゼンスを発揮していることがわかる。

²⁴⁴ Elizabeth Howell, US Military Wants to Demonstrate New power Systems in Space by 2027. *Space.Com* (29th May 2022). Retrieved from <https://www.space.com/nuclear-power-propulsion-space-defense-innovation-unit-contracts>

²⁴⁵ Elizabeth Howell, US Military Picks 3 Companies to Test Nuclear Propulsion in Cislunar Space *Space.Com* (21st April 2021). Retrieved from <https://www.space.com/darpa-contracts-nuclear-propulsion-cislunar-space>

²⁴⁶ Sandra Erwin, DARPA Moving Forward with Development of Nuclear Powered Spacecraft. *Space News* (4th May 2022). Retrieved from <https://spacenews.com/darpa-moving-forward-with-development-of-nuclear-powered-spacecraft/>

²⁴⁷ アスタミューゼ再委託レポート, p. 54。