

第6章 プルトニウムの分離を終わらせる

1. 1 トンの平均的な地殻岩石中にある 3 グラムのウラン 238 は約 3 メガワット日の熱エネルギーまたは 260×10^9 ジュールを秘めている。それは 1 トンの石炭が出すエネルギーの約 10 倍である。
2. Leo Szilard, "Liquid Metal Cooled Fast Neutron Breeders," March 6, 1945. 再版では Bernard T. Feld et al., *The Collected Works of Leo Szilard* (Cambridge, MA: MIT Press, 1972), 369. 増殖炉は第二次世界大戦終了直後に原子力に関する論文に登場した。例えば次を参照。"A mother pile [reactor] would supply the distant power plant with fissionable material," J. Marschak, "The Economics of Atomic Power," *Bulletin of the Atomic Scientists of Chicago*, February 15, 1946, 3.
3. Alfred Perry and Alvin Weinberg, "Thermal Breeder Reactors," *Annual Review of Nuclear Science* 22 (1972): 317. 第 2 章で議論されたように、ウラン 233 はプルトニウムとほぼ同じ臨界質量を持つ核分裂性物質である。原子炉内で天然のトリウム (トリウム 232) が 1 個の中性子を吸収し、できたトリウム 233 が放射壊変を起こすことで生み出される。
4. 例えば次を参照。Glenn Seaborg, "The Plutonium Economy of the Future" (presented at the Fourth International Conference on Plutonium and Other Actinides, Santa Fe, New Mexico, 1970).
5. Richard Garwin, "The Role of the Breeder Reactor" in Frank Barnaby, ed., *Nuclear Energy and Nuclear Weapons Proliferation* (London: Taylor and Francis, 1979), 141.
6. 水の水素原子の陽子の原子核は中性子とほぼ同じ質量を持つ。そのため中性子は陽子との 1 回の衝突でそのエネルギーを最大ですべて失うことができる—ちょうど 1 つのビリヤード球が別の球と正面衝突をしたときのように。
7. Leo Szilard, "Liquid Metal Cooled Fast Neutron Breeders."
8. Richard G. Hewlett and Francis Duncan, *Nuclear Navy 1946–1962* (Chicago: University of Chicago Press, 1974), 274.
9. Thomas B. Cochran et al., *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status* (Princeton, NJ: International Panel on Fissile Materials, February 2010), 6, www.fissilematerials.org/library/rr08.pdf.
10. Cochran et al., *Fast Breeder Reactor Programs*.
11. O. M. Saraev, "Operating Experience with Beloyarsk Fast Reactor BN600 [Nuclear Power Plant]," *Unusual Occurrences During LMFR Operation, Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 9–13 November 1998*, IAEA-TECDOC-1180 (Vienna: International Atomic Energy Agency: October 2000), 101–116. 同期間に、他にナトリウム漏れが環境中へは 13 回、蒸気発生器へは 12 回あった。しかしその後の 13 年間、ナトリウム漏れは報告されていない。N. N. Oshkanov et al., "30 Years of Experience in Operating the BN-600 Sodium-Cooled Fast Reactor," *Atomic Energy* 108, no. 4 (2010): 234–239.
12. R. B. Fitts and H. Fujii, "Fuel Cycle Demand, Supply and Cost Trends," *IAEA Bulletin* 18, no. 1 (1976): 19. 回収コストの範囲は U_3O_8 1 ポンド当たり最大 30 ドル (1975 年のドルで) と考えられていた。これは 2010 年のドルでキログラム当たり約 260 ドルに相当する。ワンスルー燃料サイクルで必要とされるウランは GWe 年当たり 160–200 トンと仮定している。
13. Table 3 in *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*, (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013).
14. 発見資源と推定未発見資源の回収コストは最大 130 ドル/kgU と見積もられている。Organization for Economic Cooperation and Development Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency, *Uranium 2011: Resources, Production and Demand* (OECD Nuclear Energy Agency, 2012), Table 1.10, 1.11, 1.14.

15. 原子力発電所の運転当初の 10 年間、その発電コストは炉の資本コストに大きく依存する。資本コストの支払いが済んだ後、その運転コストは一般に kWh 当たり数セントである。
16. 例えば次を参照。 Erich A. Schneider and William C. Sailor, “Long-term Uranium Supply Estimates,” *Nuclear Technology* 162, no. 3 (2008): 379–387.
17. 放射性廃棄物管理公社 ANDRA 英訳要旨には、フランスの 2006 年の放射性物質及び廃棄物計画法が、「[核変換] システムの将来の商業化見通しのアセスメントと、2020 年 12 月 31 日以前にパイロットプラントを稼働させる」ことを要求している（3 条 1 項）、www.andra.fr。フランスの原子力機関は、この項目が、新たなナトリウム冷却炉を建設する根拠であると解釈している。
18. 1970 年代の増殖炉のデザインでは起動用として GW(e) 当たり 5~6 トンの核分裂性プルトニウム（プルトニウム 239 及びプルトニウム 241）、あるいは 7~10 トンの軽水炉プルトニウムを必要とした。それには 1 年間分の交換燃料が含まれている。 Table II in *Fast Breeders, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE)* (Vienna: International Atomic Energy Agency, 1980).
19. *A Brief History of Reprocessing and Cleanup in West Valley, NY, Fact Sheet* (Union of Concerned Scientists, December 2007).
20. Anthony Andrews, *Nuclear Fuel Reprocessing: U.S. Policy Development*, RS22542 (Washington, DC: Congressional Research Service, Library of Congress, March 27, 2008); J. Michael Martinez, “The Carter Administration and the Evolution of American Nuclear Nonproliferation Policy, 1977–1981,” *Journal of Policy History* 14, no. 3 (2002) 261–292.
21. Andrews, *Nuclear Fuel Reprocessing*, 3.
22. 前掲書。
23. *Comparative Analysis of Alternative Financing Plans for the Clinch River Breeder Reactor Project* (Washington, DC: U.S. Congressional Budget Office, 1983).
24. Cochran et al., *Fast Breeder Reactor Programs*, 103.
25. さらにインドは 4 番目の再処理プラントをトロンベイに建設し、核兵器用プルトニウムを分離するために使用している。
26. Harold A. Feiveson et al., *Managing Spent Fuel from Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World* (Princeton, NJ: International Panel on Fissile Materials, September 2011).
27. *Oxide Fuels, Preferred Option* (UK Nuclear Decommissioning Authority, June 2012), www.nda.gov.uk.
28. 重水炉（HWR）の使用済み燃料は約 0.35 パーセントのプルトニウムを含んでいる。次の文献の付録を参照。 *Global Fissile Material Report 2010: Balancing the Books: Production and Stocks* (Princeton, NJ: International Panel on Fissile Materials, 2010), www.fissilematerials.org/library/gfmr10.pdf。英国の改良型ガス炉（AGR）の使用済み燃料は約 0.55 パーセントのプルトニウムを含み、マグノックス炉の燃料は約 0.3 パーセントである。 David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996: World Inventories, Capabilities and Policies* (Oxford: Oxford University, 1997), 136–138.
29. Mitchell Reiss, *Bridled Ambition: Why Countries Constrain Their Nuclear Capabilities* (Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1995); Kurt M. Campbell, Robert J. Einhorn, and Mitchell Reiss, *The Nuclear Tipping Point: Why States Reconsider Their Nuclear Choices* (Washington, DC: Brookings Institution Press, 2004); Thomas Johansson, “Sweden’s Abortive Nuclear Weapons Project,” *Bulletin of the Atomic Scientists*, March 1986.
30. “Tokai Plutonium Removal Figures Revised,” *Japan Times*, April 2, 2003. IAEA には「封じ込め監視」という副次的な防御手段がある。それは封印及び転換される可能性がある地点で、通常とは異なるいかなる活動も探知するモーション起動カメラである。しかし、少なくとも封印は通常、偶然に破られることがあり、その時は不明になっている物質がないかどうかを調べるために不確かな測定に戻らざるを得ない。

31. 二酸化プルトニウムの粉末は吸入すると非常に癌を誘発しやすい。100 万人の人たちが全体で 1 グラムを吸入したとすると、癌による死者が 1 万人程度増えることになるだろう。Steve Fetter and Frank von Hippel, "The Hazard from Plutonium Dispersal by Nuclear-Warhead Accidents," *Science & Global Security* 2 (1990).
32. W. R. Lloyd, *Dose Rate Estimates from Irradiated Light-Water-Reactor Fuel Assemblies in Air*, UCRL-ID-115199 (Lawrence Livermore National Laboratory, 1994). 30 MWt 日/kgU の核分裂エネルギーを放出した燃料は、50 年後の線量率は時間当たり約 9.2 グレイ(Gy/hr)である。BWR 燃料では約 4.7 Gy/hr である。約 100 年後、その線量率は 1 Gy/hr よりも下がり、使用済み燃料はもはや「自己防護的」とは見なされない。チェルノブイリ原発事故後の包括的評価によれば、LD_{50/60} 線量—浴びた人の半数が 60 日以内に放射線症で死亡する線量—は治療が施されなければ 2.5 Gy, 「十分な治療が受けられたときは」5 Gy, 「骨髄移植がうまくいけばおそらく最大で約 9 Gy」と結論づけられた。 *Sources and Effects of Ionizing Radiation* (New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation [UNSCEAR], Report to the General Assembly, 1988), 596.
33. グローブボックスは、通常は大部分が透明なプラスチック製の密閉された空間で、大気圧未満に保たれ、作業者が吸入の危険に曝されることなく有毒物質を内部で処理することができるように袖と手袋が組み込まれている。
34. プルトニウムの割合は、ウラン 235 の割合よりも大きい。なぜなら低速中性子で連鎖反応を起こすプルトニウム同位体が、連鎖反応を起こさないプルトニウム同位体であるプルトニウム 238, プルトニウム 240, プルトニウム 242 に混ぜられているからである。
35. 重金属 1 キログラム当たり 43 MWt 日の燃焼度の LEU 燃料からのプルトニウムは、プルトニウム 239 を 53 パーセント含んでいる。このプルトニウムでつくられた MOX 燃料の使用済み燃料のプルトニウムは、プルトニウム 239 を 37 パーセント含んでいる。プルトニウム 241 の割合は LEU 燃料が 15 パーセントであるのに対して MOX 燃料では 17 パーセントとわずかに高いが、プルトニウム 241 は半減期 14 年ですぐに壊変する。次の文献の表 9 及び 12 を参照。 *Plutonium Fuel: An Assessment, Report by an Expert Group* (Paris: OECD Nuclear Energy Agency, 1989).
36. 回収されたウラン中のウラン 235 の割合は天然ウランとほぼ同じである。またウラン 236 を含むが、それは核分裂をせずに中性子を吸収する。ウラン 236 の中性子吸収効果に打ち勝つためにはそのウランの濃縮度を約 0.5 パーセント高める必要がある。次の文献の第 7 図を参照。 *Management of Reprocessed Uranium: Current Status and Future Prospects*, IAEA-TECDOC-1529 (Vienna: International Atomic Energy Agency, February 2007).
37. J. M. Charpin, B. Dessus, and R. Pellat, *Economic Forecast Study of the Nuclear Power Option, Report to the Prime Minister*, July 2000. この文献の 43, 56, 214, 及び 215 頁の表で、1999 年のフランスフランスの為替レートは 2006 年には 0.20 ドルに等しいとした。
38. Mycle Schneider, (July 22, 2013 年 7 月 22 日付私信).
39. Aileen Mioko Smith, "Letters Sent to Countries Potentially on the Route of the MOX Fuel Shipment" (Green Action, Kyoto, March 5, 2013), www.greenaction-japan.org.
40. Feiveson et al., *Managing Spent Fuel from Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World*.
41. 酸素を含んでいる唯一の処分場として検討されているのは、提案されているネバダ州ユッカマウンテンの米国の処分場である。ここは地下水位よりも上に位置する。
42. *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation* (Washington, DC: National Academy Press, 1996), 3.
43. R. Bari et al., *Proliferation Risk Reduction Study of Alternative Spent Fuel Processing*, BNL-90264-2009-CP (Upton, NY: Brookhaven National Laboratory, July 2009).
44. Mycle Schneider and Yves Marignac, *Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France* (Princeton, NJ: International Panel on Fissile Materials, April 2008), 30–40.

45. ガラス固化は実際には困難であることがわかっており、危険な高レベルの放射性廃液が大量に蓄積される。2011年、この問題に対して最もオープンにしている英国の核規制局は、セラフィールド再処理プラントに液体として貯蔵している酸化物燃料からの核分裂生成物の溶解量を、使用済み燃料2,000トン相当を上限とし、ウラン金属「マグノックス」燃料からの核分裂生成物を含めた全体では使用済み燃料5,500トン相当を限界とする提案を行った。*HAL [High Active Liquor] Stocks, Specification No. 793, Project Assessment Report* (UK Health and Safety Executive, Office of for Nuclear Regulation, 2011), 27. これはセシウム137で最大140メガキュリー(MCi)にほぼ等価で、チェルノブイリ原発事故で放出された量の約70倍である。(マグノックス燃料中のウラン1トン当たり4,000 MWt日の核分裂が起こり、改良型ガス冷却炉の酸化物燃料中のウラン1トン当たり20,000 MWt日であり、MWt日当たり3.2 Ciのセシウム137が生み出され、燃料を取り出して平均10年が経過していると想定した。)
46. MOX使用済み燃料に含まれているプルトニウム及びアメリシウムは、再処理もプルトニウムのリサイクルもされないで処分場に収められるそれらの量の約60パーセントである。
47. Roald Wigeland, *Repository Benefit Analysis*, ANL-AFCI-089 (Argonne National Laboratory, 2003), 14.
48. *Trial Calculation of Nuclear Fuel Cycle Cost, Discussion Paper* (Japan Atomic Energy Commission, Subcommittee on Nuclear Power and Fuel Cycle Options, October 25, 2011); *Nuclear Decommissioning Authority: Managing Risk at Sellafield* (House of Commons Committee of Public Accounts, 2013), 3.
49. “Sellafield: Plant With an Image Problem,” *BBC News*, July 23, 1998.
50. 割引率ゼロを想定した。“Japan AEC Finds Direct Disposal Less Costly than Reprocessing,” *Nuclear Intelligence Weekly*, November 28, 2011.
51. この見積もりは、毎年800トンの使用済み燃料の再処理を40年にわたって続け、使用済み燃料からの平均総発熱量は重金属1キログラム(kgHM)当たり45MWt日で、炉の熱エネルギーの電気への変換比を1/3と仮定した。
52. *Global Fissile Material Report 2010*, chapters 2 and 3.
53. Fiona Harvey, “Sellafield MOX Nuclear Fuel Plant to Close,” *The Guardian*, August 3, 2011; Steve Connor, “How a Money-Making Strategy From the 1960s Left Behind a Toxic Legacy,” *The Independent*, April 11, 2011.
54. *Management of the UK’s Plutonium Stocks: A Consultation Response on the Long-Term Management of UK-Owned Separated Civil Plutonium* (UK Department of Energy and Climate Change, December 2011).