

第7章 高濃縮ウランの原子炉利用を終わらせる

1. J. E. Matos, “Technical Challenges for Conversion of Civilian Research Reactors in Russia” (paper presented at the NAS-RAS Research Reactor Committee Briefing, National Academy of Sciences, Washington, DC, November 29, 2010).
2. *U.S. Nuclear Weapons Complex: Security at Risk* (Washington, DC: Project on Government Oversight, 2001).
3. Communiqué of the Washington Nuclear Security Summit, April 13, 2010, fpc.state.gov/documents/Organization/140355.pdf.
4. Oleg Bukharin and William Potter, “Potatoes Were Guarded Better,” *Bulletin of the Atomic Scientists*, June 1995.
5. Victor Gilinsky and Roger J. Mattson, “Revisiting the NUMEC Affair” *Bulletin of the Atomic Scientists* 66, no. 2 (April 2010).
6. 1997年、米国海軍は使用済み海軍推進炉燃料の HEU 保管量を 2035 年に 65 トンとする計画を立てた。David Curtis, “Naval Nuclear Propulsion Program; Introduction to Spent Naval Fuel” (presented at the U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, Meeting of the Panel on the Repository, Augusta, GA, December 17, 1997), www.nwtrb.gov. 米海軍推進炉燃料の再処理は 1992 年に終了したので、97.3 パーセント濃縮ウラン中でウラン 235 の 40 パーセントが核分裂をしたとすると、これは毎年平均 2.5 トンの取り出しに相当することになる。この率は新しく製造した炉心での率よりもいくらか大きいと想定している。なぜなら原子力潜水艦の数が減ったからである。次を参照。 *Global Fissile Material Report 2010: Balancing the Books, Production and Stocks* (Princeton, NJ: International Panel on Fissile Materials, 2010), 32, www.fissilematerials.org/library/gfmr10.pdf.
7. Gary Person, Dale Davis, and Russ Schmidt, “Progress Down-Blending Surplus Highly Enriched Uranium” (presented at the 50th Annual INMM Meeting, Institute of Nuclear Materials Management, Tucson, AZ, 2009).
8. 世界の全研究炉についての情報は次を参照。 IAEA Research Reactor Database, nucleus.iaea.org/RRDB.
9. 1955 年にジュネーブで初めて開催された Atoms for Peace 会議で、アルビン・ワインバーグ（当時は米原子力委員会オークリッジ国立研究所所長）は「諸外国に提供される予定の 20 パーセントに濃縮された UO_2 ・アルミニウム燃料要素のサンプルが、LITR 及び MTR の両方で現在テスト中であると、たったいま国から連絡があった」と報告した。すなわち、オークリッジ国立研究所では 2 つの研究炉が稼働していた。 Session 9A, Volume II, August 12, 1955, p. 430, in *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy Held in Geneva, August 8–20, 1955* (New York: United Nations, 1956).
10. *Highly Enriched Uranium: Striking a Balance. A Historical Report on the United States Highly Enriched Uranium Production, Acquisition, and Utilization Activities from 1945 through September 30, 1996* (Washington, DC: U.S. Department of Energy, December 2005), fig. 6-3, www.fissilematerials.org/library/doe01rev.pdf.
11. N. V. Arkhangelskiy, “Problems of the Research Reactors Conversion from HEU to LEU: History and Perspectives” (presented at the Russian-American Symposium on the Conversion of Research Reactors to LEU, Moscow, June 8, 2011).
12. HEU を燃料とする研究炉を保有する 25 の非核保有国は次に記されている。 *Global Fissile Material Report 2010*, chap. 11. その時点で 9 つの核保有国もまたすべてが HEU を燃料とする研究炉を保有していた。インド、イスラエル、北朝鮮とパキスタンはすべて核兵器を開発する前に

提供されていた。インド (Apsara, 1956), イスラエル (IRR-1, 1960), 北朝鮮 (IRT-DPRK, 1965), パキスタン (PARR-1, 1965). IAEA Research Reactor Database, nucleus.iaea.org/RRDB.

13. *Summary Volume, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE)* (Vienna: International Atomic Energy Agency, 1980), 40, 255–257.
14. 初期の体系的な議論は次を参照。R. G. Muranaka, “Conversion of Research Reactors to Low-Enrichment Uranium Fuels,” *IAEA Bulletin* 25, no. 1 (1984).
15. “Limiting the Use of Highly Enriched Uranium in Domestically Licensed Research and Test Reactors,” *Federal Resister* 51, no. 37 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, February 25, 1986).
16. Matos, “Technical Challenges for Conversion of Civilian Research Reactors in Russia.”
17. D. M. Wachs, *RERTR Fuel Development and Qualification Plan* (Idaho National Laboratory, INL/EXT-05-01017, Revision 3), January 2007.
18. “The Russian Reactor Conversion Program Might Begin to Work in 2013,” *RIA Novosti*, October 1, 2012, <http://ria.ru>.
19. S. V. Kiriyyenko and D. Poneman, “Joint Statement of the Co-Chairs of the Nuclear Energy and Nuclear Security Working Group of the Bilateral U.S.-Russia Presidential Commission,” June 27, 2013.
20. HEU を燃料とするロシアの研究炉リストは IPFM のウェブサイトにある。
www.fissilematerials.org/facilities/researchreactors/russia.html.
21. Energy Policy Act of 1992, Sec. 903, “Restrictions on Nuclear Exports.”
22. Arkhangel'skiy, “Problems of the Research Reactors Conversion from HEU to LEU: History and Perspectives.”
23. これは物理的には可能である。なぜなら転換前の燃料のアルミニウム被覆内の「身」に含まれているウランはほとんどの場合、1.7 g(U)/cc (立方センチメートル当たりのウランのグラム数) 未満であり、開発中の燃料の密度は 15g(U)/cc にまで及ぶからである。Wachs, *RERTR Fuel Development and Qualification Plan*. 第一世代の高密度燃料の「身」は、アルミニウム母材の中に様々なウラン化合物粒子を分散した形で含んでいる。1988 年までに U_3Si_2 粒子を用いて 4.8 g(U)/cc の密度を達成している。Matos, “Technical Challenges for Conversion of Civilian Research Reactors in Russia.”
24. Alexander Glaser and Uwe Filges, “Neutron-Use Optimization with Virtual Experiments to Facilitate Research-Reactor Conversion to Low-Enriched Fuel,” *Science & Global Security* 20, nos. 2–3 (2012): 141–154.
25. N. E. Woolstenhulme et al., “Recent Accomplishments in the Irradiation Testing of Engineering-Scale Monolithic Fuel Specimens” (presented at the 34th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Warsaw, Poland, 2012).
26. 2004 年 5 月より前に 38 基が転換され、2013 年までにさらに 27 基が転換された。Armando Travelli, “Status and Progress of the RERTR Program in the Year 2004” (presented at the 26th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Vienna, 2004). Jeff Chamberlin, U.S. Department of Energy, Global Threat Reduction Initiative, (2013 年 4 月 11 日付私信).
27. Ole Reistad and Styrkaar Hustveit, “HEU Fuel Cycle Inventories and Progress on Global Minimization,” *Nonproliferation Review* 15, no. 2 (July 2008). 2010 年に Styrkaar Hustveit によって更新された (2011 年 8 月 11 日付私信)。リストは 82 基の定常状態炉、8 基のパルス炉、37 基の臨界集合体からなる。
28. 中国は小型の中性子源炉 (MNSR) を建設し、カナダの SLOWPOKE 炉は炉心に 0.9–1.0 キログラムの HEU が含まれている。
29. Andrew Bieniawski, “An Overview of the NNSA Global Threat Reduction Programs Goals for HEU Minimization” (presented at the 31st International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Beijing, China, 2009).

30. *Non-HEU Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m*, IAEA Nuclear Energy Series NF-T-5.4 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013), 10–11.
31. *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments* (Paris: OECD Nuclear Energy Agency, September 2012).
32. “Rolls-Royce Declines to Comment on Vulcan Future,” *BBC*, November 3, 2011. スコットランドのドーンレイにあるヴァルカン潜水艦炉サイトは 1950 年代に建設され、2015 年以降に閉鎖されることになっている。（訳注：ロールスロイス社が運営するこの試験サイトで海軍推進炉の炉心の運用、実証試験が行われてきた）。
33. Harold F. McFarlane, “Is It Time to Consider Global Sharing of Integral Physics Data?” *Journal of Nuclear Science and Technology* 44, no. 3 (2007): 518–521.
34. HEU を燃料とする米国の 5 基目の臨界集合体はアイダホ国立研究所の高性能試験炉と連携している。
35. ロシアの最も「機微な」核施設（リストは公表されていない）は内務省の「省内防衛隊」である国内軍によってガードされている。Pavel Podvig, (2011 年 8 月 28 日付私信)。
36. アイダホ国立研究所の HEU を燃料とする過渡事象試験炉(TREAT)は、急速な出力上昇の間の核燃料の振る舞いをテストするために使用されてきたが、10 年以上の間「冷温準備状態（コールドスタンバイ）」状態だった。 *Ten-Year Site Plan, 2014–2013*, DOE/ID-11474 (Idaho National Laboratory June 2012), www.inl.gov/publications/d/ten-year-site-plan.pdf. TREAT を再び使用するには燃料の改修と近代化が必要である。その燃料は黒鉛に酸化ウランが約 0.01 原子パーセントの濃度で分散している。この希釈レベルでは盗難の対象とはならない。J. H. Handwerk and R. C. Lied, *The Manufacture of the Graphite-Urania Fuel Matrix for TREAT*, ANL-5963 (Argonne National Laboratory, 1960).
37. “Alternative Source for Neutron Generation” (U.S. Department of Defense Small Business Innovation Research, 2012), www.dodsbir.net.
38. S. M. Myers, “Qualification Alternatives to the Sandia Pulsed Reactor (QASPR) Program Science in Sandia’s Physical, Chemical, & Nano Sciences Center (PCNSC): Overview,” *Research Briefs, Sandia National Laboratories*, 2007.
39. Edward J. Parma et al., *Operational Aspects of an Externally Driven Neutron Multiplier Assembly Concept Using a Z-Pinch 14-MeV Neutron Source (ZEDNA)* (Sandia National Laboratories, September 2007).
40. *INL’s 52 Reactors*, Idaho National Laboratory, nuclear.inel.gov/52reactors.shtml.
41. Chunyan Ma and Frank von Hippel, “Ending the Production of Highly Enriched Uranium for Naval Reactors,” *Nonproliferation Review* 8, no. 1 (Spring 2001): 86–101.
42. 米国はポーツマス・ガス拡散プラントでウラン 235 を 96 パーセント以上に濃縮した HEU だけを生産した。97 パーセントを超える定期的な生産は 1964 年に開始され、1992 年まで続いた。米国の HEU の濃縮生産の正史は次のように述べている。「1960 年代半ばまでプラントは核兵器、海軍核推進炉プログラム、そしてその他の防衛の必要性のために HEU を生産した。防衛の必要性は満たされたので米国は 1964 年に兵器用 HEU の生産を中止した。……1964 年以降、米国はポーツマスで海軍推進炉、宇宙及び研究炉のために HEU の生産を続けた」。次の文献の 64 頁と表 5.4 を参照。 *Highly Enriched Uranium: Striking a Balance. A Historical Report on the United States Highly Enriched Uranium Production, Acquisition, and Utilization Activities from 1945 through September 30, 1996*.
43. 1991 年にソ連が崩壊してからはロシアの潜水艦はほとんど航海に出ておらず、20 年以上も燃料交換をしていない。次の文献の表 4.2 を参照。 *Global Fissile Material Report 2010*.
44. 前掲書 123 頁。また次を参照。M. V. Ramana, “An Estimate of India’s Uranium Enrichment Capacity,” *Science & Global Security* 12, nos. 1–2(2004): 115–124.

45. “France’s Future SSNs: The Barracuda Class,” *Defense Industry Daily*, December 21, 2011, www.defenseindustrydaily.com. フランスのジョルジュ・ベス II 濃縮プラントは最大 6 パーセントまでの LEU の生産が認められている。
46. *Global Fissile Material Report 2010*, 101.
47. Leonam dos Santos Guimaraes (2011 年 7 月付私信) .
48. 2013 年, ロシアは 4 隻のアルクチカ級原子力砕氷艦を保有している. すなわちロシア(1985 年に進水), ソヴィエツキー・ソユーズ(1990 年), ヤマール(1993 年), *50 Let Pobedy* (戦勝 50 周年記念, 2007). それぞれは 171 MWt の原子炉 2 基を備えている. 3 隻の小型船——河川砕氷艦タイミール(1989 年), バイガチ(1990 年) 及びコンテナ船セブモルプーチ (1988 年) ——は 135 MWt の原子炉 1 基を備えている. すべて HEU を燃料としている. Anna Kireeva and Rashid Alimov, “Rosatom Takes over Russia’s Nuclear Powered Icebreaker Fleet,” *Bellona Foundation*, August 28, 2008, www.bellona.org.
49. *Global Fissile Material Report 2010*, 60–63.
50. 次の文献の表 2 を参照. Alexander Nikitin and Leonid Andreyev, *Floating Nuclear Power Plants* (Bellona Foundation, 2011).
51. “Small Nuclear Reactors for Power and Icebreaking,” *World Nuclear News*, October 7, 2011.
52. Fiscal Year 1995 Defense Authorization Act, Public Law 103-337, Section 1042.
53. Director, Naval Nuclear Propulsion, *Report on Use of Low Enriched Uranium in Naval Nuclear Propulsion* (Washington, DC: U.S. Department of Energy June 1995), 10, www.fissilematerials.org/library/onnp95.pdf.
54. 報告書は、その比が 20 パーセント及び 93.5 パーセント高濃縮ウランにおけるウラン 235 の比から期待される 4.7 ではないことを説明している. なぜなら「 ^{238}U とその核分裂性変換生成物の ^{239}Pu 及び ^{241}Pu が核分裂を起こし、さらに燃料中の体積当たりの核分裂がより小さく算定される」ためである. Director, Naval Nuclear Propulsion, *Report on Use of Low Enriched Uranium in Naval Nuclear Propulsion* (Washington, DC: U.S. Department of Energy, June 1995), 10, www.fissilematerials.org/library/onnp95.pdf.
55. 1 隻の攻撃型原潜に対して追加コストは 4 億ドルになるだろう. そのうち 2.5 億ドルは「政府供給の炉心と原子炉の重機器」のためのものである. 残りは原潜のサイズの増加によるものである. より大型の弾道ミサイル原潜及び空母は、炉心を大型化しても、それに合わせてサイズを大きくする必要はないだろう. 弾道ミサイル原潜に対する追加コストは「原子炉設備と炉心」に 3.25 億ドル, 原子力空母に対しては「政府供給の炉心と原子炉の重機器に 12.3 億ドル以上」になる. 平均して 1 年間に 1.5 隻の攻撃型原潜, 3 分の 1 隻の弾道ミサイル原潜, 4 分の 1 隻の原子力空母が建設されると仮定した (前掲書 24 頁). 燃料製造コストは炉心が同じサイズを維持し, 原潜の場合は 3 回交換, 原子力空母の場合は 2 回交換するとして, 攻撃型原潜炉心の場合は 0.85 億ドル/炉心, 弾道ミサイル原潜の場合は 1.15 億ドル, 2 基の原子力空母炉心の場合は 5.9 億ドルである. HEU は攻撃型原潜 1 隻当たり 0.7 トン, 弾道ミサイル原潜で 1 トン, 原子力空母で 5 トンとすると, このコストはウラン 1 キログラム当たり 10 万ドルになるだろう. これは高中世子束同位体生産炉のコストとほぼ同じである. J. D. Sease et al., *Conceptual Process for the Manufacture of Low-Enriched Uranium/Molybdenum Fuel for the High Flux Fuel Isotope Reactor*, ORNL/TM-2007/39 (Oak Ridge National Laboratory, 2007). しかし, 海軍推進炉心のデザインはそれほど複雑ではない.
56. *Report on Use of Low Enriched Uranium in Naval Nuclear Propulsion*, 1.
57. *FY 2013 Congressional Budget Request* (Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2012), 484.
58. “France’s Future SSNs: The Barracuda Class.”

59. Y. Girard (presented at the Conference on the Implication of the Acquisition of Nuclear-Powered Submarines [SSN] by Non-Nuclear Weapons States, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, March 27, 1989).
60. Office of Naval Reactors, *Report on Low Enriched Uranium for Naval Reactor Cores* (Washington, DC: U.S. Department of Energy, January 2014), www.fissilematerials.org/library/doel4.pdf.