

第2章 核分裂性物質の生産、使用、在庫

1. Frederick Soddy, “Radium,” in A. T. Moore, ed., *Professional Papers of the Corps of Royal Engineers, Volume XXIX, 1903* (Chatham: Royal Engineers Institute, 1904), 251–252.
2. H. G. Wells, *The World Set Free* (London: Macmillan, 1914).
3. シラードの伝記はここを参照。 William Lanouette, *Genius in the Shadows: A Biography of Leo Szilard: The Man Behind the Bomb* (New York: C. Scribner’s Sons, 1992).
4. 前掲書 205–206.
5. Niels Bohr and John A. Wheeler, “The Mechanism of Nuclear Fission,” *Physical Review* 56 (September 1, 1939).
6. 3番目の同位体（ウラン 234）はウラン 238 が壊変してできたもので、天然ウラン中の濃度は極めて小さい（0.0055 パーセント）。
7. Otto Frisch and Rudolph Peierls, “Memorandum on the Properties of a Radioactive ‘Super bomb’” (Birmingham University, March 1940). 著者たちは、ウラン濃縮のアイデアはドイツ国民にはまだ知られていないかもしれないので国民にはまだ当面の間、これらのレポートは秘密にすべきだと考えていた。
8. 高速中性子に対するウラン 235 の核分裂断面積は 10^{-23} cm^2 と推定された。しかし実際には約 10 倍小さく 10^{-24} cm^2 に近かった。
9. ハイゼンベルグの様々な推定値とそれらの議論はここで検討されている。 Thomas Powers, *Heisenberg’s War: The Secret History of the German Bomb* (New York: Knopf, 1993), 447–451.
10. これが核兵器管理の文献で確立している「核分裂性」という用語の使用法である。それに対して核工学では、もしどんなエネルギーの中性子、つまり高速中性子でも熱中性子でも核分裂を起こす（そして核分裂連鎖反応を維持する）とき、その同位体は「核分裂性」と判断される。高エネルギー中性子でしか核分裂を起こさない同位体は「核分裂可能」と判断される。言い換えると、ウラン 235 は核分裂可能で核分裂性であり、ウラン 238 は核分裂可能だけである。
11. David L. Clark and David E. Hobart, “Reflections on the Legacy of a Legend: Glenn T. Seaborg, 1912–1999,” *Los Alamos Science*, 2000, 56–61.
12. ネプツニウム 237 とアメリシウム 241 が原子炉内でウラン燃料の照射によって、プルトニウムのように、生み出されるのに対して、ウラン 233 は原子炉内でトリウムが中性子を捕獲することで生み出される。
13. 分離ネプツニウムの保有量の推定は非常に難しい。ネプツニウム 237 は使用済み燃料中のプルトニウム量の約 6 パーセントを占め、ウラン・プルトニウム全重量の約 0.07 パーセントに相当する。原理的には、ネプツニウムは容易に分離できるが、再処理プラントでは一般的に廃棄の流れとともに捨てられている。1998年3月31日時点で、米国エネルギー省は 446 キログラムのネプツニウム 237 を保有している。そのうち 351 キログラムは分離された形態であった。
“Facsimile to David Albright from the Office of Declassification Security Affairs, U.S. Department of Energy, April 14, 1998,” cited in David Albright and Kimberly Kramer, *Neptunium 237 and Americium: World Inventories and Proliferation Concerns (Revised)* (Institute for Science and International Security, August 22, 2005).
14. Edward Teller, *The Legacy of Hiroshima* (Garden City, NY: Doubleday, 1962).
15. ウランの転換工程については次を参照。 Manson Benedict, Thomas H. Pigford, and Hans Wolfgang Levi, *Nuclear Chemical Engineering*, 2nd ed. (New York: McGraw-Hill Book Company, 1981), 236–274.

16. 熱拡散法を用いた同位体分離の科学的根拠と歴史については次を参照。 G. Müller and G. Vasaru, “The Clusius-Dickel Thermal Diffusion Column—50 Years After Its Invention,” *Isotopenpraxis in Environmental and Health Studies* 24, nos.11–12 (1988): 455–464.
17. Vincent C. Jones, *Manhattan: The Army and the Atomic Bomb* (Washington, DC: Center of Military History, U.S. Army 1985), 172–183.
18. 1945年9月までに、オークリッジ・サイトの1組のカルトロンは平均濃縮度84.5パーセントの濃縮ウランを88キログラム以上生産した。前掲書148。
19. David Holloway, *Stalin and the Bomb* (New Haven: Yale University Press, 1994).
20. Mahdi Obeidi and Kurt Pitzer, *The Bomb in My Garden: The Secret of Saddam’s Nuclear Mastermind* (Hoboken, NJ: Wiley, 2004). 1990年代初期のイラクのカルトロン開発計画は、マンハッタン・プロジェクトの電磁式濃縮開発プログラムの熟練者の援助を受けた国際原子エネルギー機関の査察官たちが発見した。次を参照。 Leslie Thorne, “IAEA Nuclear Inspections in Iraq,” *IAEA Bulletin*, no.1 (1992): 16–24. イラクの査察に関するIAEAの総合報告書は国連安全保障理事会に提出された。“Letter dated 6 October 1997 from the Director General of the International Atomic Energy Agency to the Secretary-General,” United Nations Security Council S/1997/779, October 8, 1997.
21. 1940年初めに、サイモンは薄い金属の多孔性隔膜を分離膜として使うことを思いついた。 Nancy Arms, *A Prophet in Two Countries: The Life of F. E. Simon* (Oxford: Pergamon Press, 1966), 109.
22. Holloway, *Stalin and the Bomb*. また次を参照。 Pavel V. Oleynikov, “German Scientists in the Soviet Atomic Project,” *Nonproliferation Review* 7, no. 2 (Summer 2000): 1–30.
23. 歴史については次を参照。 R. Scott Kemp, “The End of Manhattan: How the Gas Centrifuge Changed the Quest for Nuclear Weapons,” *Technology & Culture* 53, no. 3 (July 2012). 引用は次から。 F. A. Lindemann and F. W. Aston, “The Possibility of Separating Isotopes,” *Philosophical Magazine* 37, no. 221 (1919): 523–534.
24. Richard G Hewlett and Oscar E. Anderson, *The New World: A History of the United States Atomic Energy Commission, Volume 1, 1939–1946*, California Studies in the History of Science (University of California Press, 1962), 49–107. 遠心分離プロジェクトは1944年1月に正式に取りやめとなった。さらに詳細な歴史は次を参照。 The centrifuge project was formally canceled in January 1944. For a more detailed history, see B. C. Reed, “Centrifugation During the Manhattan Project,” *Physics in Perspective* 11, no. 4 (2009): 426–441.
25. さらに詳細な説明は次を参照。 R. Scott Kemp, “Nonproliferation Strategy in the Centrifuge Age” (PhD thesis, Princeton University, 2010).
26. Allan S. Krass et al., *Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation* (London and New York: Taylor & Francis Ltd. 1983), 127 and 134.
27. 効率的にHEUを生産するにはカスケードの再構成が望ましいが、兵器級ウランの生産を開始するのにさらに遅れが生ずることになるだろう。
28. Alexander Glaser, “Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation,” *Science & Global Security* 16, nos. 1–2 (2008): 1–25.
29. どちらの場合も最後の流れのウランの典型的な劣化の程度を0.3パーセントとしている。
30. Rodney P. Carlisle and Joan M. Zenzen, *Supplying the Nuclear Arsenal: American Production-Reactors, 1942–1992* (Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1996), 26–45.
31. E. A. G. Larson, *A General Description of the NRX Reactor*, AECL-1377 (Chalk River, Ontario: Atomic Energy of Canada Limited, July 1961), www.fissilematerials.org/library/lar61.pdf; Donald G. Hurst, *Canada Enters the Nuclear Age: a Technical History of Atomic Energy of Canada Limited* (Montreal: McGill-Queen’s University Press, 1997).
32. ウラン235の非核分裂性捕獲を起点に、主に多重の中性子捕獲によって少量のプルトニウム238もまた生み出される。

33. フランシス・バーチが引用している研究者概要 (Researchers Brief) によれば、広島原爆には 64.1 キログラムの高濃縮ウランが含まれていた。A. Francis Birch, *Report of Gun Assembled Nuclear Bomb*, October 6, 1945. バーチのリポート自体はもはや入手不可能である。詳細は次を参照。John Coster-Mullen, *Atom Bombs: The Top Secret Inside Story of Little Boy and Fat Man* (Waukesha, WI: John Coster-Mullen, 2005), 121.
34. John Malik, *The Yields of the Hiroshima and Nagasaki Nuclear Explosions*, LA-8819 (Los Alamos National Laboratory, 1985).
35. 広島原爆はテストをせずに使用された。南アフリカの核兵器開発プログラムの検討は第3章を参照。
36. *Manual for Protection and Control of Safeguards and Security Interests*, DOE-M- 5632.1C-1 (Washington, DC: U.S. Department of Energy, Office of Security Affairs, Office of Safeguards and Security July 15, 1994).
37. 「戦術」(戦域)兵器には砲身型が使用されたものがあつた。例えば次を参照。Thomas B. Cochran, William M. Arkin, and Milton M. Hoenig, *Nuclear Weapons Databook, Volume I: U.S Nuclear Forces and Capabilities* (Cambridge, MA: Ballinger Publishing Company, 1984).
38. “On the Goals and the Program of Tests at the Test Site No. 2 in 1953” (Council of Ministers of the USSR Decision of 1953, 1953). 解析については次を参照。Pavel Podvig, “Interesting Document about Soviet Nuclear Tests in 1953,” *Russian Strategic Forces*, 2012, russianforces.org/blog/2012/10/interesting_document_on_soviet.shtml.
39. *Restricted Data Declassification Decisions 1946 to the Present (RDD-8)* (U.S. Department of Energy, January 1, 2002), 70.
40. 1951年4月、米国は15回目の核実験(グリーンハウス作戦の「アイテム」爆弾)でブーストの原理を初めて実証した。*United States Nuclear Tests, July 1945 Through September 1992*, DOE/NV-209, Revision 15 (U.S. Department of Energy, Nevada Operations Office, December 2000).
41. J. Carson Mark, “Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium,” *Science & Global Security* 4, no. 1 (1993).
42. *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Materials Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*, DOE/ NN-0007, 37-39 (Washington, DC: U.S. Department of Energy, January 1997), www.fissilematerials.org/library/dae97.pdf
43. 前掲書。