

第 2 章 原子力開発の歴史

内容

第2章 原子力開発の歴史.....	9
2.1 放射線の発見（1890～1930年代）[1,2].....	15
2.1.1 エックス線の発見.....	16
2.1.2 ラジウム・ポロニウムの発見、放射能の発見.....	16
2.1.3 アルファ線・ベータ線・ガンマ線の発見.....	16
2.1.4 原子構造（原子核・電子）の実証.....	16
2.1.5 中性子の発見.....	16
2.2 核分裂の発見と実証（1900～1940年代）[1,2].....	19
2.2.1 ウラン壊変の発見.....	20
2.2.2 質量とエネルギーの等価性の証明.....	20
2.2.3 核変換の実証.....	20
2.2.4 人工放射能の発見.....	20
2.2.5 核分裂の発見.....	20
2.2.6 核分裂中性子の発見.....	20
2.2.7 核分裂連鎖反応の実証.....	21
2.3 原子爆弾の開発（1940～1960年代）[1,3].....	24
2.3.1 原子力の軍事利用と原子爆弾.....	25
2.3.2 マンハッタン計画.....	25
2.3.3 核拡散防止条約による核兵器開発の規制.....	26
2.4 発電用原子炉の開発（1950～1970年代）[1].....	28
2.4.1 原子力の平和利用と発電用原子炉.....	29
2.4.2 発電用原子炉の炉型選定と「原子炉物理」の役割.....	29
2.4.3 発電用原子炉概念の誕生.....	30
2.4.4 増殖炉概念の誕生.....	31
2.4.5 加圧水型軽水炉概念の誕生.....	31
2.4.6 潜水艦用原子炉の開発.....	32
2.4.7 世界初の商業用原子炉の運転開始.....	33
2.4.8 沸騰水型軽水炉概念の誕生.....	33
2.4.9 アメリカ以外の国における発電用原子炉開発.....	34
2.4.10 石油危機に伴う原子力発電利用の進展.....	35
2.5 原子力事故（1970～2010年代）[3,4].....	37
2.5.1 スリーマイル島原子力発電所事故.....	38
2.5.2 チェルノブイリ原子力発電所事故.....	38
2.5.3 福島第一原子力発電所事故.....	39
2.6 福島第一原子力発電所事故後の原子力開発（2010年以降）[3,4,5].....	42

2.6.1	各国の原子力開発政策.....	43
2.6.2	世界的なエネルギー需要の増加.....	43
2.6.3	地球温暖化に伴う原子力発電需要の増加.....	44
2.6.4	原子炉の世代と次世代原子炉開発.....	44
2.6.5	廃止措置技術の開発.....	45

【この章のポイント】

- ・ 原子力開発の歴史は、19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけて欧州を中心に相次いだ放射線の発見、及び核分裂の発見と実証により幕を開け、第二次世界大戦下の国際政治の渦の中で原子爆弾の開発につながった。
- ・ 戦後の 20 世紀中盤において、予算・人材規模で他国を圧倒するアメリカを中心に、軽水炉を主体とする発電用原子炉の開発が強力に推進され、「原子炉の物理」、すなわち核分裂を制御する技術の基礎が確立された。
- ・ 20 世紀後半から 21 世紀初頭にかけて経験した重大な原子力事故の教訓と、今日の世界的なエネルギー需要の増加により、原子力安全の向上に資する開発が益々重要となっており、その中核的な技術基盤として「原子炉の物理」が果たすべき役割は大きい。

原子力開発の歴史とは、他の発電方式（火力・再生可能エネルギー等）とは異なる原子力固有の技術（原子炉を原子炉たらしめている技術）に関する開発の歴史であり、「原子炉の物理」に係る技術基盤と密接な関係がある。したがって、「原子炉の物理」を学ぶ上で、その成り立ちの背景＝原子力開発の歴史を学ぶことには大きな意義がある。

本章では、19 世紀後半から 20 世紀初頭に相次いだ放射線の発見から、20 世紀中盤に大きく進展した発電用原子炉の開発、20 世紀後半から 21 世紀初頭にかけて経験した原子力事故を踏まえた今後の原子力開発まで、約 1 世紀超の原子力開発の歴史を概観する。本章の構成に沿って整理した原子力開発の概略年表を表 2-1 に示す。

表 2-1 原子力開発の概略年表

年代	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020	
放射線の発見	△1895 △1898 △1898 △1900	エックス線の発見(2.1.1節) ラジウム・ポロニウムの発見、放射能の発見(2.1.2節) アルファ線、ベータ線の発見(2.1.3節) △1900 ガンマ線の発見(2.1.3節)													
核分裂の発見と実証		△1902 ウラン爆変の発見(2.2.1節) △1905 質量とエネルギーの等価性の証明(2.2.2節) △1911 原子構造(原子核・電子)の実証(2.1.4節) △1919 核変換の実証(2.2.3節)		△1919 核変換の実証(2.2.3節) △1932 中性子の発見(2.1.5節) △1934 人工放射能の発見(2.2.4節) △1935 核分裂の発見(2.2.5節) △1939 核分裂中性子の発見(2.2.6節) △1942 核分裂連鎖反応の実証(2.2.7節)											
原子爆弾の開発						△1940 プルトニウムの発見(2.3.1節) △1940 冶金計画(2.3.1節) △1942 マンハッタン計画(2.3.2節) △1945 世界初の核爆発実験(トリニティ実験)(2.3.2節) △1945 世界初の核兵器投下(広島・長崎)(2.3節) △1970 核拡散防止条約の発効(2.3.3節)									
発電用原子炉の開発							△1953 原子力平和利用宣言(2.4.1節) △1955 世界初の原子力潜水艦(ノーチラス号)の航海試験成功(2.4.6節) △1957 国際原子力機関(IAEA)の設立(2.4.1節) △1957 世界初の商業用原子炉(シッピング・ポート)の運転開始(2.4.7節)								
原子力事故										△1979 スリーマイル島原子力発電所事故(2.5.1節) △1986 チェルノブイリ原子力発電所事故(2.5.2節)					
福島第一原子力発電所事故後の原子力開発							2011 福島第一原子力発電所事故(2.5.3節) △						2016 パリ協定の発効(2.6.3節) △	第4世代原子炉の開発(2.6.4節) 廃止措置技術の開発(2.6.5節)	

2.1 放射線の発見（1890～1930 年代）[1,2]

【この節のポイント】

- ・ 19 世紀後半から 20 世紀前半にかけ、欧州の研究者らにより、さまざまな放射線の発見が相次ぎ、原子核および放射線に関する物理学の基礎が短期間のうちに確立した。
- ・ 中性子は、原子炉で生じる核反応の中核を担う放射線であり、中性子を含む放射線の発見が、原子力開発の出発点となった。

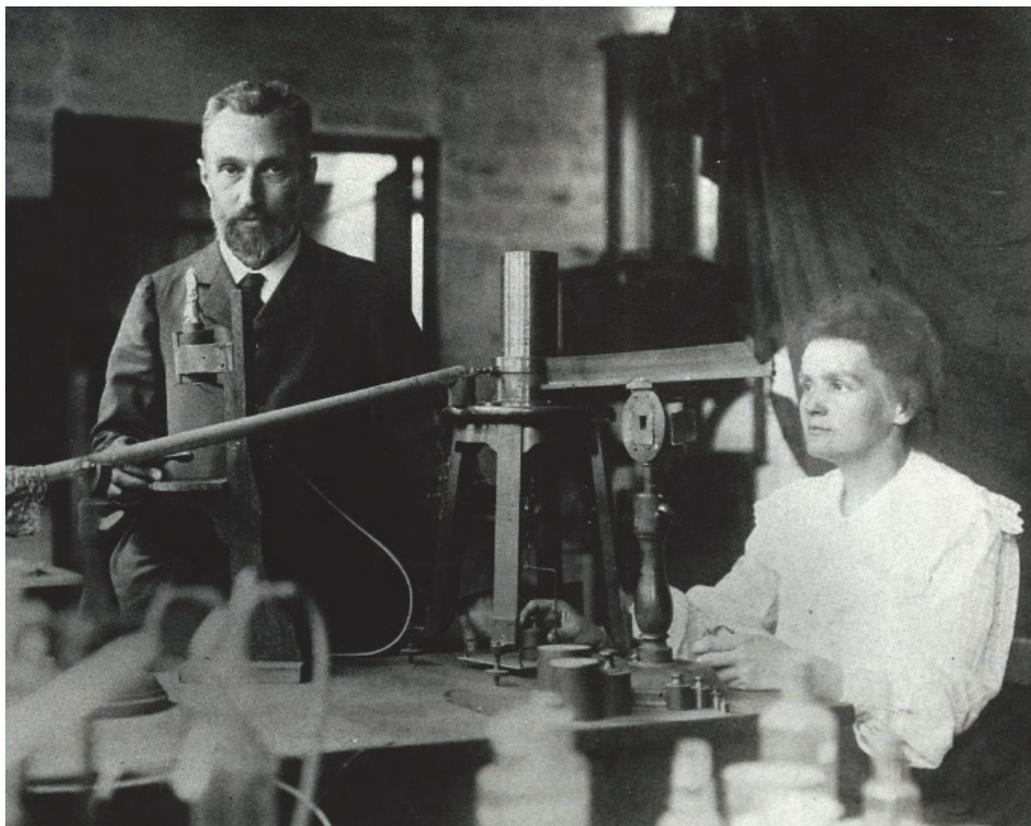


図 2-1 ラジウムとポロニウムを発見したキュリー夫妻

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%83%AA%E3%83%BB%E3%82%AD%E3%83%A5%E3%83%AA%E3%83%BC>)

ドイツの化学者マーチン・クラプロート (Martin Klaproth) は、1789 年に新しい金属元素を発見した。この元素はウラニウムと名づけられ、それは数年前に発見された天王星 (ウラヌス) に由来する。ウラニウムは地球上で天然に存在する最も重い元素として知られている。

その後、20 世紀を前に、ヴィルヘルム・レントゲン (Wilhelm Röntgen)、アンリ・ベクレル (Henri Becquerel)、キュリー夫妻 (図 2-1: Pierre Curie and Maria Curie) が、放射線と、放射線に関連する新たな自然現象を次々と発見した。

本節では、各放射線の発見について、発見された年・発見した科学者・発見の経緯等を

解説する。

2.1.1 エックス線の発見

1895年、ドイツの実験物理学者ヴィルヘルム・レントゲンは、クルックス管を用いた陰極線の実験中、黒い紙や木片などの不透明体を透過する放射線を発見した。放射線は、原子核が余分なエネルギーを発散する際に放出する高速粒子や高エネルギーの電磁波である。レントゲンは、この放射線の正体が未解明であったことから、「未知のもの」という意味でエックス線と名づけた。

翌1896年、フランスの物理学者アンリ・ベクレルは、放射線がウラン鉱石から放出されていることを発見した。後に訪れる物理学の変革において、レントゲンとベクレルによる放射線の発見が、その出発点となった。

2.1.2 ラジウム・ポロニウムの発見、放射能の発見

1898年、ピエールとマリーのキュリー夫妻は、放射性物質であるラジウムとポロニウムを発見した。また、トリウムやウランなどの元素がもつ「放射線を放出する性質」を放射能と名づけた。

その後1914年、マリー・キュリーはパリにラジウム研究所を設立し、放射能研究を推進した。後に、原子力開発の中核である核分裂研究において数多くの功績を残すこととなる当研究所のフレデリック・ジョリオ（Frederic Joliot-Curie）は、マリー・キュリーの娘イレーヌと結婚し、放射能研究にまい進した。

2.1.3 アルファ線・ベータ線・ガンマ線の発見

1898年、イギリスの物理学者アーネスト・ラザフォード（Ernest Rutherford）は、トリウムやウランからエックス線とは異なる2種類の放射線が放出されていることを発見し、アルファ線、ベータ線と名づけた。後に、ベータ線は $-e$ の負電荷を持ち、アルファ線は $+2e$ の正電荷をもつヘリウムの原子核であることが実証された。

1900年、フランスの化学者ポール・ヴィラール（Paul Villard）は、エックス線よりも透過力が大きく、磁場で曲がらない放射線がラジウムから放出されていることを発見した。ラザフォードは、この放射線をガンマ線と名づけた。

2.1.4 原子構造（原子核・電子）の実証

1911年、ラザフォードは、原子の質量が、その中心にある非常に小さな領域に集中していることを明らかにした。ラザフォードは、この小さな領域（原子核）は正の電荷をもっており、その外側に、非常に軽い負の電荷をもつ電子が存在することを実証した。

2.1.5 中性子の発見

1932年、イギリスの物理学者ジェームズ・チャドウィック（James Chadwick）は、ポロ

ニウムから放出されるアルファ線をベリリウムに衝突させることにより、中性子を発見した。ラザフォードは、1920年代に中性子の存在を予言していたが、電荷をもたないために検出が容易ではなく、他の放射線よりも後に発見された。

中性子の発見を受け、ドイツの物理学者ヴェルナー・ハイゼンベルク (Werner Heisenberg) は、原子核が陽子と中性子で構成されていると考えた。

中性子は、その後開発されることになる原子炉において生じる核反応の中核を担う放射線であり、中性子の発見が原子力開発の出発点となった。

【コラム】原子力開発に関連したノーベル賞受賞者

原子力に関する研究開発が推進される過程では、その基礎・基盤研究に従事した数多くの科学者がノーベル賞を受賞した。当時の時代背景として、原子力開発そのものが科学・技術分野における重要な成果に位置づけられていたことが示唆される。

原子力開発に関連したノーベル賞受賞者を表 2-2 にまとめる。本章に登場する多くの科学者らが、1900～1930年代に受賞していたことがわかる。

表 2-2 原子力開発に関連したノーベル賞受賞者一覧 (1/2)

受賞年度	受賞部門	受賞者	国籍 (受賞時)	受賞理由	関連節
1901	物理学	ヴィルヘルム・レントゲン	ドイツ	エックス線の発見	2.1.1
1903	物理学	アンリ・ベクレル	フランス	自発的放射能の発見	2.1.1
同上	物理学	ピエール・キュリー	同上	ベクレルによって発見された放射現象に関する共同研究	2.1.2
同上	同上	マリー・キュリー	同上	同上	同上
1908	化学	アーネスト・ラザフォード	イギリス	元素の崩壊、放射性物質の化学に関する研究	2.1.3, 2.2.1
1911	化学	マリー・キュリー	フランス	ラジウムおよびポロニウムの発見とラジウムの性質およびその化合物の研究	2.1.2
1921	物理学	アルベルト・アインシュタイン	スイス	理論物理学に対する貢献、特に光電効果の法則の発見	2.2.2
1922	物理学	ニールス・ボーア	デンマーク	原子構造と原子から放射に関する研究についての貢献	2.2
1927	物理学	アーサー・コンプトン	アメリカ	彼に因んで命名されたコンプトン効果の発見	2.2.7
1932	物理学	ヴェルナー・ハイゼンベルク	ドイツ	量子力学の創始ならびにその応用、特に同素異形の水素の発見	2.1.5
1935	物理学	ジェームズ・チャドウィック	イギリス	中性子の発見	2.1.5
1938	化学	フレデリック・ジョリオ・キュリー	フランス	人工放射性元素の発見	2.2.4
同上	同上	イレーヌ・ジョリオ・キュリー	同上	同上	同上
1938	物理学	エンリコ・フェルミ	イタリア	中性子放射による新放射性元素の存在証明および関連して熱中性子による原子核反応の発見	2.2.5, 2.2.6

表 2-2 原子力開発に関連したノーベル賞受賞者一覧 (2/2)

受賞年度	受賞部門	受賞者	国籍 (受賞時)	受賞理由	関連節
1944	化学	オットー・ハーン	ドイツ	原子核分裂の発見	2.2.5
1951	化学	グレン・シーボルク	アメリカ	超ウラン元素の発見	2.3.1
1974	平和	佐藤栄作	日本	非核三原則の提唱	2.4.1
2005	平和	国際原子力機関	—	原子力エネルギーの平和的利用に対する貢献	2.4.1

【コラム】現代物理学における日本人科学者の活躍

第二次世界大戦後の1949年、湯川秀樹は日本人として初めてノーベル賞を受賞した。湯川の受賞では、素粒子物理学分野における「中間子理論」が理由とされており、表 2-3 に示すように、その後も素粒子に関する成果で複数の日本人および日本出身の科学者らがノーベル物理学賞を受賞している。素粒子は、物質を構成する最小の単位であり、その基礎研究は原子力開発と密接に関連する。

日本では、湯川のノーベル賞受賞以前から、素粒子物理学のもととなる量子力学の分野において精力的に研究が進められ、仁科芳雄が、その先駆的な役割を果たした。仁科は日本の現代物理学の父と呼ばれており、表 2-3 に名を連ねたノーベル賞受賞者をはじめ、数多くの科学者に影響を与えた。また、仁科芳雄の次男である仁科浩二郎は、名古屋大学で原子炉物理研究を主導し、理論・実験両面で先進的な成果をあげた[6]。

近年は、日本の基礎研究の取り組みが組織としても大きな成果をあげている。理化学研究所のRI ビームファクトリーで生成された113番元素が国際的に新元素として認定された。2016年、この元素が、理化学研究所仁科加速器科学研究センターの研究グループが提案した「ニホニウム (Nh)」に命名される快挙を遂げた[7]。

表 2-3 日本人および日本出身のノーベル物理学賞受賞者一覧 (2019年9月時点)

受賞年度	受賞者	受賞理由
1949	湯川秀樹	中間子の存在の予想
1965	朝永振一郎	量子電気力学分野での基礎的研究
1973	江崎玲於奈	半導体におけるトンネル効果の実験的発見
2002	小柴昌俊	天体物理学、特に宇宙ニュートリノの検出に対するパイオニア的貢献
2008	小林誠	小林・益川理論とCP対称性の破れの起源の発見による素粒子物理学への貢献
同上	益川敏英	同上
同上	南部陽一郎	素粒子物理学における自発的対称性の破れの発見
2014	赤崎勇	高輝度で省電力の白色光源を可能にした青色発光ダイオードの発明
同上	天野浩	同上
同上	中村修二	同上
2015	梶田隆章	ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見

2.2 核分裂の発見と実証（1900～1940年代）[1,2]

【この節のポイント】

- ・ 20世紀前半において、欧州の研究者らにより原子力開発の中核となる核分裂研究が進展し、「核変換の実証」、「核分裂の発見」等、重要な成果が相次いで創出された。
- ・ 1942年12月2日、エンリコ・フェルミらにより、アメリカのシカゴ大学フットボール・スタジアムの観客席下にあるスカッシュ・コートに設置された原子炉で臨界実験が行われ、世界で初めて核分裂連鎖反応が実証された。



図 2-2 シカゴ・パイル 1 号の初臨界の様子

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B7%E3%82%AB%E3%82%B4%E3%83%BB%E3%83%91%E3%82%A4%E3%83%AB1%E5%8F%B7>)

放射線が相次いで発見された 20 世紀前半は、原子力開発の中核となる核分裂研究についても大きく進展した。欧州では、原子核や核反応を研究する複数のグループが、新しい理論や実験結果を次々と発表し、原子核と放射線に関する物理学の基礎が一挙に確立された。

フランスでは、ジョリオ・キュリーが核分裂研究で多大な功績を残した。イギリスでは、アーネスト・ラザフォードが原子構造模型を提唱した。デンマークでは、ニールス・ボーア (Niels Bohr) がアルベルト・アインシュタイン (Albert Einstein) と量子力学で大きな論争を繰り広げ、彼らは現代物理学の双璧と呼ばれた。ドイツでは、オットー・ハーン (Otto Hahn) が核分裂を発見した。イタリアには、後にアメリカに渡り、世界最初の原子炉となる「シカゴ・パイル」(図 2-2: Chicago Pile) を完成させ、核分裂連鎖反応の実証を成功に導いたエンリコ・フェルミ (Enrico Fermi) がいた。彼らが、原子・原子核・放射能・量子物理分野の研究にまい進した結果、核分裂に係る重要な成果が相次いで創出された。

本節では、核分裂の発見と実証に大きく寄与した成果について、成果が得られた年・科学者・成果創出の経緯等を解説する。

2.2.1 ウラン壊変の発見

1902年、アーネスト・ラザフォードは、ウランがアルファ線を放出して別の原子に変わること（壊変）を発見した。

2.2.2 質量とエネルギーの等価性の証明

1905年、ドイツ出身の物理学者アルベルト・アインシュタインは、質量とエネルギーの等価性を証明する「特殊相対性理論」を発表した。

2.2.3 核変換の実証

1919年、ラザフォードは、ある原子を人工的に別の原子に変えられること（核変換）を証明した。これを機に、多くの科学者が、さまざまな原子に放射線を衝突させ、別の原子に変換させる実験に取り組んだ。

2.2.4 人工放射能の発見

1934年、フレデリック・ジョリオ・キュリーとイレーヌ・ジュリオ・キュリーは人工放射能を発見した。1935年、ジョリオ・キュリーはノーベル賞授賞式後の記念講演で、「将来我々科学者は原子を自由に分割したり、くっつけたりすることができるようになるだろう。その時には莫大なエネルギーが放出されるだろう」と述べた。当時、この予言は物理学の世界に大きな衝撃を与えた。本講演を機に、多くの科学者が、莫大なエネルギーを放出する核分裂の実証研究にまい進した。

2.2.5 核分裂の発見

1935年、イタリアの物理学者エンリコ・フェルミは、ウランに中性子を衝突させ、ウランより重い元素を発見したと発表したが、この発表は誤りであることが後に明らかとなった。その後1938年、ジョリオ・キュリーらは、フェルミの実験を追証した結果、ウランに中性子を衝突させるとウランより軽い元素（バリウム）ができることを発見した。

この発見の確認に時間がかかる中、同年12月、ドイツの化学者オットー・ハーンとオーストリア出身の物理学者リーゼ・マイトナー（Lise Meitner）は、ウランに中性子を衝突させると放射性のバリウムが生成されることを発見した。また、マイトナーは、ウランの原子核が中性子を吸収すると、二つの原子核に割れること（核分裂）を発見した。こうして、「核分裂の発見」という歴史的栄誉は、ハーンとマイトナーの手に渡った。

アインシュタインが証明した質量とエネルギーの等価性に基づいて計算された結果と、マイトナーの考察による結果は合致し、ウランの核分裂によって膨大なエネルギーが放出されることが示唆された。

2.2.6 核分裂中性子の発見

1939年、エンリコ・フェルミは、中性子が核分裂によって放出される可能性が高いこと

を指摘した。

同年、ジョリオ・キュリーは、ウランに中性子を衝突させると核分裂を起こし、より軽い2つの元素ができ、その際にエネルギーが放出され、同時にいくつかの中性子も放出されることを発見した。

この発見は、原子力エネルギーの利用を考えるうえで重要な意味をもっていた。すなわち、エネルギーの放出を伴う核分裂を起こすには、ウランに中性子を衝突させる必要があるが、もし核分裂のたびに新たに中性子が生まれるならば、ウランに中性子を1個だけ衝突させることにより、核分裂反応を次から次へと連鎖的に生じさせることができる。この連鎖反応こそ、大量のエネルギーを発生させるために必要となる現象であった。

核分裂の発見後、ジョリオ・キュリーは、核分裂によるエネルギー発生に関する3件の特許（2件は原子炉、1件は原子爆弾）を申請した。これを機に、ジョリオ・キュリーを中心としたフランスの科学者らが原子力開発を牽引することとなった。

2.2.7 核分裂連鎖反応の実証

放射線の発見や核分裂の発見に係る成果は、欧州の科学者を中心に創出されたものであったが、1939年、エンリコ・フェルミが祖国イタリアからアメリカに移住したのを機に、アメリカの原子力開発が急速に進展し、開発の先駆者が取って代わった。当時、イタリアでムッソリーニによるファシズムが全盛期を迎えていたことがフェルミ移住のきっかけであったといわれている。

当時、アメリカのフランクリン・ルーズベルト（Franklin Roosevelt）大統領は、第二次世界大戦の勃発とアメリカの参戦を不可避と考えていた。ルーズベルトは、フェルミらによる研究成果を受け、核分裂エネルギーの軍事利用を目的とした研究体制を整えた。研究が開始された1941年当時、核分裂研究は既に核分裂連鎖反応を実証する段階まで進んでいた。アメリカ政府による強力な資金援助のもと、最初の原子炉の実験計画が1942年半ばに開始され、フェルミが指揮をとることとなった。

1942年、原子爆弾の開発を目的とし、シカゴ大学の冶金研究所が研究拠点とされた。アーサー・コンプトン（Arthur Compton）が所長となり、コンプトンの下で、フェルミが物理部長に任命された。当時、原子爆弾の開発を目的とした研究は「冶金計画」という暗号名で呼ばれた。冶金研究所には、アメリカ中から多くの優秀な科学者が招集され、最盛期には約2,000名もの科学者が研究にまい進した。その後、「冶金計画」の本拠地がニューヨークのマンハッタンに移され、新たな暗号名「マンハッタン計画（Manhattan Project）」のもと、核分裂研究が強力に推し進められていった。

同年、フェルミらは、核分裂連鎖反応の実証実験に着手した。シカゴ大学のフットボール・スタジアムの観客席下にあるスカッシュ・コートに、約50トンの天然ウランを置き、その周囲に減速材である黒鉛ブロックを積み重ねていった。黒鉛ブロックが約400トンになったところで、ウランに中性子を衝突させた結果、核分裂連鎖反応が生じ、臨界状態（核分裂連鎖反応が持続される状態）が確認された。

こうして、フェルミらは、臨界となる条件をうまく揃えれば核分裂連鎖反応を起こせることを世界で初めて実証した。これは、1942年12月2日の出来事である。本実験は、黒鉛ブロックを何万個も積み重ねたものであることから、当時は「原子パイル」（現在は「シカゴ・パイル」と呼ばれている。）と呼ばれたが、これが世界初の原子炉となった。

上述した核分裂連鎖反応に係る基礎・基盤技術の開発を経て、マンハッタン計画の規模はさらに大きくなった。ナチス・ドイツが核分裂エネルギーの軍事利用を先に成功させることを恐れたアメリカは、原子爆弾の製造に突き進んでいった。

【コラム】フランスとアメリカにおける気質の違い[1]

フランスは、科学・芸術・文化等の幅広い分野において、歴史上傑出した人物を数多く輩出してきた国である。その一方、優れた個人の発明や能力をまとめあげ、国全体として大きな力を発揮することは得意でないといわれてきた。そのため、組織化が必須となる工学の分野では、それを得意とするアメリカに先を越されることが多々あったようである。

原子力開発においても、フランスとアメリカにおけるこのような気質の違いが見てとれる。すなわち、放射線の発見や核分裂研究の段階においては、フランスを中心に、ジョリオ・キュリーをはじめとする個々の優れた研究者が数多くの成果を創出し、原子力開発を牽引した。その後、アメリカで原子爆弾の開発という国家レベルの目標が設定されると、核分裂連鎖反応の実証を皮切りに、組織化の得意なアメリカが予算・人材の規模を活かし、世界の原子力開発の担い手に取って代わった。

その後、アメリカの原子力開発は、原子爆弾だけでなく、発電用原子炉についても世界を牽引してきた。アメリカの2大重電メーカーである、ウェスティングハウス（Westinghouse: WH）社とゼネラルエレクトリック（General Electric: GE）社は、それぞれ加圧水型軽水炉（Pressurized Water Reactor: PWR）と沸騰水型軽水炉（Boiling Water Reactor: BWR）を開発し、軽水炉プラント技術をアメリカ国内だけでなく世界に開放した結果、軽水炉は、今や世界の原子炉シェアの大半を占めるに至っている。

【コラム】日本の原子力開発

本書は日本の教科書であるが、日本に関連する原子力開発については割愛した。その理由は、日本の原子力技術がアメリカからの技術導入によるものであり、純然たる独自開発とはいえないためである。また、その背景として、1952年にサンフランシスコ講和条約が発効されるまで、敗戦国である日本では、GHQ（連合国軍総司令部）の占領政策として原子力開発が全面的に禁止され、開発の着手が遅れたことも関係している。

原子力開発の黎明期において、大局的な歴史の時間軸上に日本の原子力開発は現れないが、今日、日本が「原子力先進国」と呼ばれるに至る背後には、数多くの先人達による努力がある。第二次世界大戦後、原子力開発が遅れていた日本では、(i)原子力の研究開発を推進するため、早期に原子炉を建設すること、(ii)物理・化学・生物等の基礎研究を行うこと、(iii)ラジオアイソトープを生産すること、および(iv)研究者・技術者を養成すること等

を目的とし、日本初の原子炉 JRR-1 (Japan Research Reactor No.1) が建設された[8]。

JRR-1 は日本原子力研究所 (当時) が建設・運転を手がけた、通称湯沸し型と呼ばれる均質溶液型の小型研究炉である。1956 年 8 月に着工され、1957 年 6 月に完成した。同年 8 月 27 日、炉心は臨界に達し、日本で初めて「第 3 の火」=原子力の灯がともされた。その後、運転停止までの 11 年間、エネルギー約 182 MWh、運転時間 8,043 時間の実績を残した。JRR-1 の建設・運転を通じて、日本は原子力人材育成の基盤を構築し、炉物理実験、照射実験等の基礎技術に係る知見を着実に蓄積していった。

JRR-1 の臨界到達後、日本初の「発電用」原子炉 JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) が建設された[8]。JPDR は日本原子力研究所 (当時) が運転を手がけた、GE 社製の BWR である。1963 年 10 月 26 日、日本で初めて原子力発電に成功し、これを記念して 10 月 26 日は「原子力の日」に制定された。

JRR-1、JPDR を起点とした 20 世紀中盤以降における日本の原子力開発の歴史については、日本原子力学会賞「原子力歴史構築賞」の受賞案件[8]が参考になる。各案件の概要を一通り眺めるだけでも、数多くの先人達が積み上げてきた成果と、そのために払われてきた努力の大きさ・熱量を体感することができる。

2.3 原子爆弾の開発（1940～1960年代）[1,3]

【この節のポイント】

- ・ 核分裂連鎖反応を大量かつ瞬間的に生じさせるか、徐々に行わせるかで、その用途は「原子爆弾」と「発電用原子炉」に大別されるが、核分裂反応が発見・実証された20世紀前半から中盤にかけては、政治的影響（ナチス・ドイツの台頭、第二次世界大戦の勃発）により、原子爆弾の開発・製造技術が先行して確立された。
- ・ アメリカは、世界に先駆けて原子爆弾を開発するため、マンハッタン計画を立ち上げ、その製造と実験に成功した。
- ・ 第二次世界大戦後は、核軍縮を目的とし、戦勝国のうち一部の国以外に核兵器の開発・保有を認めない核拡散防止条約が制定されたが、実際の核軍縮は進んでいない。

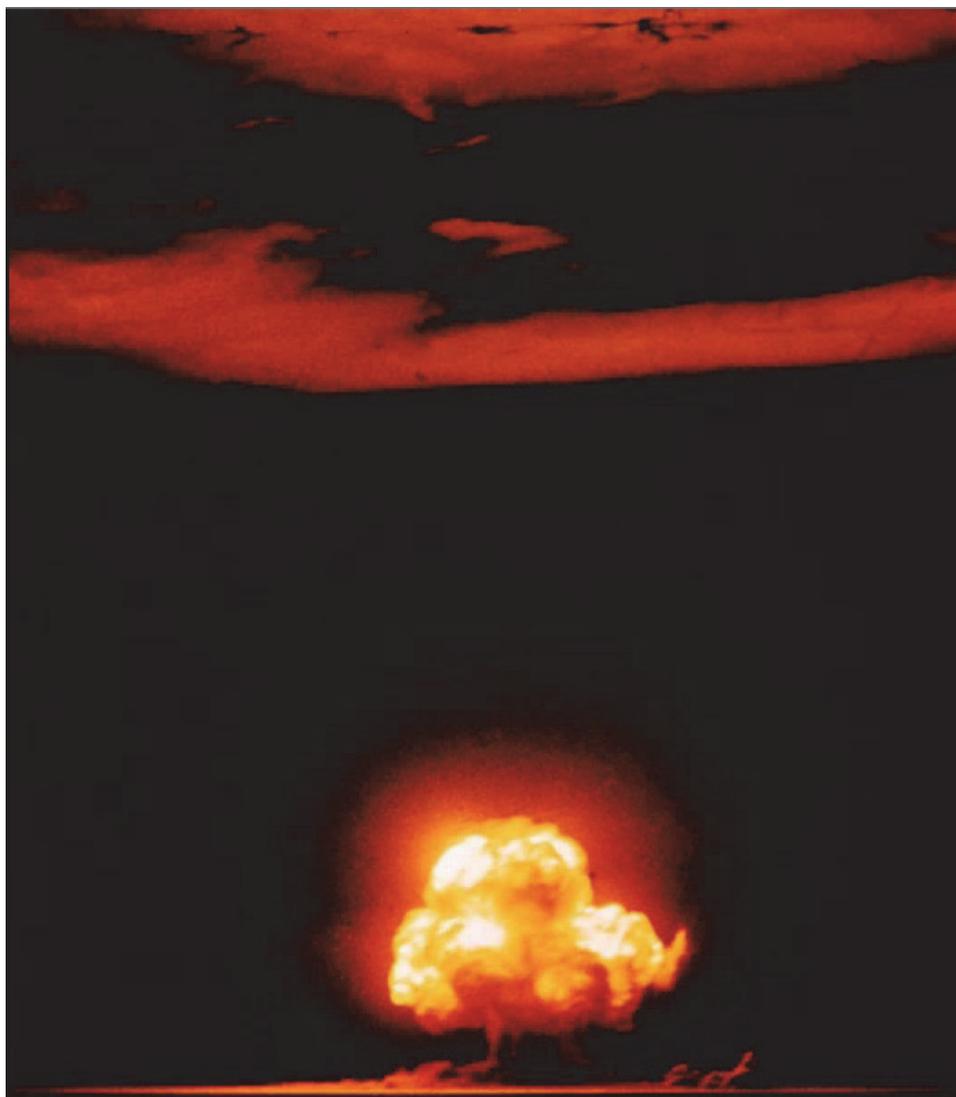


図 2-3 世界初の核実験（トリニティ実験）における核爆発直後の様子

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%88%E3%83%AA%E3%83%8B%E3%83%86%E3%82%A3%E5%AE%9F%E9%A8%93>)

核分裂連鎖反応の実証により、これまで人類が経験したことのない莫大なエネルギーが得られることが明らかとなり、その相反する 2 つの用途が必然的に見出された。1 つは、核分裂連鎖反応を大量かつ瞬間的に生じさせ、爆発的なエネルギーを生み出す原子爆弾(大量破壊兵器)、もう 1 つは、核分裂連鎖反応を徐々に行わせ、適度なエネルギーを長時間にわたり継続的に取り出す発電用原子炉であった。

核分裂の発見と同時期にナチス・ドイツが台頭し、第二次世界大戦が勃発したことから、ナチスが世界に先駆けて原子爆弾の開発に成功することを恐れた連合国側では、アメリカが国中の科学者を集めて原子爆弾を開発・製造し、1945 年 7 月の核実験 (図 2-3) を経て、翌 8 月、世界で初めて原子爆弾を核兵器として広島と長崎に投下するに至った。その威力と悲惨さを経験した人類は、原子爆弾の投下から 70 年以上が経った今も、「兵器としての核分裂エネルギー」=核兵器を手放すことはできていない。

本節では、アメリカを中心とした原子爆弾の開発の歴史を解説する。

2.3.1 原子力の軍事利用と原子爆弾

ナチス・ドイツの台頭を機に、アメリカで原子爆弾の開発が開始された。これは、大量破壊兵器としての核分裂エネルギー利用、すなわち軍事利用を意味する。

ナチス・ドイツによる迫害を恐れたハンガリーの物理学者レオ・シラード (Leo Szilard) は、イタリアのエンリコ・フェルミと同様、アメリカへの移住を選択した。シラードは、核分裂エネルギーの軍事利用が政治的圧力に直結しうることに気づいた。ナチス・ドイツが万一、先行してこの軍事利用に成功することとなれば、世界に大きな悲劇が訪れる恐れがあると考えた。1939 年 10 月、シラードはアルベルト・アインシュタインの支援を受けてアメリカのルーズベルト大統領に書簡を送り、この悲劇の可能性を訴えた。この書簡に込められたシラードの意図を理解したルーズベルトは、程なくして「ウランについての諮問委員会」を設置した。これを機に、アメリカでは組織的な原子力開発が開始されることとなった。

当時、アメリカの原子力研究は、フェルミ 1 人が牽引したものではなかった。1940 年、カリフォルニア大学のグレン・シーボルク (Glenn Seaborg) が、ウランに中性子を吸収させると、核分裂性の極めて高いプルトニウムという元素ができることを発見した。この発見を起点に、アメリカ中から多くの科学者が招集され、原子爆弾用プルトニウムの生産方法に関する開発が開始された。前節で述べたように、これは「冶金計画」という暗号名で呼ばれた。

2.3.2 マンハッタン計画

「冶金計画」は間もなく「マンハッタン計画」に名前を変え、原子爆弾の開発は着々と進められた。エンリコ・フェルミによる核分裂連鎖反応の実証も、この開発の一環として得られた成果であった。

その後、核分裂連鎖反応の実証を含む基礎技術の蓄積を経て、原子爆弾の開発は製造段

階に入った。計画はグローブス将軍を中心として強力に推進され、15万人規模の超大型プロジェクトとなった。開発拠点は、(i)テネシー州オークリッジ (Oak Ridge)、(ii)ワシントン州ハンフォード (Hanford)、(iii)ニューメキシコ州ロスアラモス (Los Alamos) の3箇所に置かれ、それぞれに大規模な研究・開発・製造施設が建設された。(i)にはウラン濃縮施設、(ii)にはプルトニウム生産用原子炉が建設され、(iii)では原子爆弾の設計が行われたと同時に、関連する製造施設が建設された。その後、1945年7月16日、アメリカは世界最初の核爆発実験(トリニティ実験)に成功し、マンハッタン計画は所期の目的を達成した。

本計画で建設された3施設は、その後国立研究所として生まれ変わった。(i)のウラン濃縮施設については、発電用原子炉燃料の製造に必要なウラン濃縮サービスを世界で唯一提供できる施設となった。1960～1970年代にかけ、世界中の電力会社が濃縮サービスを利用した結果、元々軍事用に建設された(i)は、初期の原子力発電を支える重要な役割を担った。原子爆弾は瞬間的に爆発させる必要があることから、天然ウラン中の核分裂性のウラン235 (U-235) の濃縮度を0.7%から90%超にまで高めることにより、核分裂連鎖反応を起こしやすくしていた。マンハッタン計画で(i)が建設されたのは、このウラン濃縮技術を開発するためであった。発電用原子炉燃料のウラン濃縮は、原子爆弾向けに90%超まで高めていたU-235の濃度を、濃縮途中の3～4%の時点で取り出すことにより対応することができた。

(ii)のプルトニウム生産用原子炉は、ウラン238 (U-238) に中性子を衝突させ、プルトニウムを生産するために建設された。建設当時、原子爆弾としては高濃縮ウランよりもプルトニウムの方が優れていることが既にわかっていたためである。プルトニウム生産炉は他の炉型と同様、核分裂連鎖反応により大量の熱を発生させることができ、発電用原子炉にもなることから、その後、旧ソ連、イギリス、フランスにおける発電用原子炉の原型となった。

2.3.3 核拡散防止条約による核兵器開発の規制

第二次世界大戦後、アメリカ以外のいくつかの国々も原子爆弾の開発・製造・実験に成功していった。その後、原子爆弾を含む核兵器の廃絶を最終目標とした核軍縮を目的として核拡散防止条約(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons: NPT)が制定され、1970年に発効された。NPTでは、1967年1月1日時点で核兵器を保有していたアメリカ、ロシア、イギリス、フランス、中国の5か国を核兵器保有国(核兵器の保有を許された国)と認定し、それ以外の国については核兵器の保有を禁止し、非核保有国とした。非核保有国が核兵器を保有した状態を「核の拡散」という。NPTは25年間の期限付であったが、1995年、無条件・無期限の延長が決定され、今や190か国以上が本条約を締結するに至っている。

NPT未加盟国や脱退国の中には核兵器を保有する国があり、多くの例外や変則的運用も許容されているため、本条約の拘束力については今も多くの課題が残されている。また、核兵器保有国と非保有国の間の不公平感や、複雑に絡み合う各国の利害・政治的背景等に

より、実際の核軍縮は進んでいない。

【コラム】 広島・長崎に投下された原子爆弾[3]

1945年7月のトリニティ実験成功後、アメリカは、太平洋戦争において日独伊軍事同盟の中で唯一残った日本の降伏を促すことを主な目的とし、同年8月、広島と長崎に原子爆弾を投下した。8月6日、広島に原子爆弾「リトルボーイ」が、同月9日には、長崎に原子爆弾「ファットマン」が、それぞれ投下された。これが世界で初めて核兵器として投下される原子爆弾となった。

リトルボーイは、U-235の濃縮度を80%超に高めた高濃縮ウランによる「ガンバレル型（砲身型）」の原子爆弾である。臨界量未満に分けられた2つの高濃縮ウランの塊を火薬により瞬時に衝突させて臨界量にもっていき、大気中の中性子をトリガーとして、瞬時に核分裂連鎖反応を起こすものである。ガンバレル型の原子爆弾は、使用前の起爆装置の誤作動等により瞬時に臨界量に達する可能性があるため、取り扱い上の安全性は低いとされる。

一方、ファットマンは、プルトニウムによる「インプロージョン型（爆縮型）」の原子爆弾である。臨界量未満に分けられた複数の球状プルトニウムの塊を火薬により瞬時に中心部に圧縮させて密度を高め臨界量にもっていき、ベリリウム・ポロニウム中性子発生器による中性子をトリガーとして、瞬時に核分裂連鎖反応を起こすものである。プルトニウムによる原子爆弾をガンバレル型としないのは、核分裂性のプルトニウム239 (Pu-239) に混在したプルトニウム240 (Pu-240) の自発核分裂による「過早核爆発」を防ぐためである。

ウラン濃縮コストの高さと原子爆弾の取り扱い上の安全性の観点から、現在の原子爆弾は、プルトニウムによるインプロージョン型が主流となっている。

2.4 発電用原子炉の開発（1950～1970年代）[1]

【この節のポイント】

- ・ 第二次世界大戦後、原子力の平和利用を目的とした発電用原子炉の開発が進み、いくつかの国で早期に実用化が達成された。
- ・ アメリカでは世界に先駆けてウラン濃縮技術が確立され、減速材としての重水や黒鉛の利用が必須でなくなったことから、濃縮ウラン・軽水減速炉（軽水炉）の開発に成功した。その結果、経済性の観点から、原子炉の他の炉型（重水炉、黒鉛炉、ガス炉等）に対する優位性が高まり、発電用軽水炉の世界シェアが一挙に広がった。
- ・ 発電用原子炉開発の根幹は、膨大な燃料・減速材・冷却材候補の中から、実用化の観点で最適な組み合わせを選択すること（炉型選定）にあり、原子炉物理は、その中核を担った。この大きな潮流の中で、原子炉物理の技術基盤それ自身が確立された。

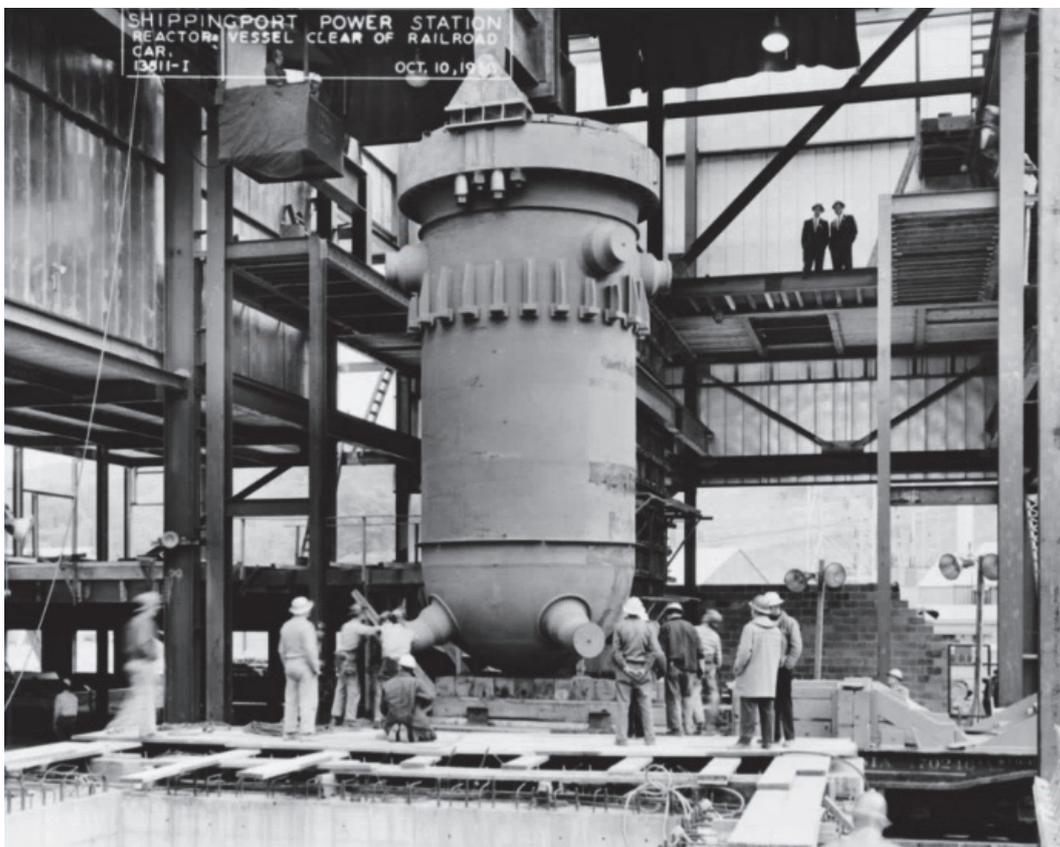


図 2-4 シッピングポート原子力発電所 1 号炉

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AC%AC1%E4%B8%96%E4%BB%A3%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89>)

第二次世界大戦後、原子力開発の黎明期を支えた科学者たちは原子爆弾の開発から解放された。彼らは戦後の技術者とともに、核分裂エネルギーの平和利用を目指した実用化研究に着手し、発電用原子炉の開発を成功に導いた（図 2-4）。

戦後復興を通じて世界的に工業化が進展する中、それを支えるエネルギー源の主体は石炭から石油に変わりつつあった。工業化の中で、将来にわたり消費が増え続けることになれば、これらの化石燃料もいずれ枯渇するリスクが見通されるようになった。また、1970年代の2度にわたる石油危機を発端に石油価格が高騰したことで、豊富な石油資源を有する中東の国々が政治力を得たことも相まって、世界情勢が再び緊迫化するのではないかと危惧されるようになった。このような中、アメリカ、フランス、イギリス、カナダ、旧ソ連等が独自に進めてきた原子力開発に成果をあげた結果、石油価格は下落し、世界は安定と活気を取り戻した。特に、自由経済市場における厳しい競争の中でアメリカが最本命として見出した軽水炉技術は、発電用原子炉開発の成功に決定的な役割を果たした。

本節では、軽水炉を中心とした発電用原子炉の開発の歴史を解説する。

2.4.1 原子力の平和利用と発電用原子炉

第二次世界大戦後も原子爆弾の開発は続き、アメリカのみならず、旧ソ連やイギリス等、いくつかの戦勝国が次々と原爆実験に成功していった。このような中、1950年6月に朝鮮戦争が始まり、中国の参戦も相まって戦線がこう着するにつれ、アメリカでは戦争の早期終結を支持する世論が広がりを見せ始めた。1952年のアメリカ大統領選挙では、朝鮮戦争の開始を主導した民主党のハリー・S・トルーマン大統領（Harry S. Truman）に対し、共和党のドワイト・デビッド・アイゼンハワー（Dwight David Eisenhower）が朝鮮戦争の早期終結を最大の選挙公約として戦い、勝利した。大統領就任後、アイゼンハワーは公約通り1953年7月に朝鮮戦争を終結させた。

1953年12月、アイゼンハワー大統領は、核軍備拡張競争（軍拡競争）への歯止めを求めるアメリカ国民の声を背景に、ニューヨークの国連本会議で「原子力平和利用宣言（Atoms for Peace）」を発表した。この宣言の中でアイゼンハワー大統領は、軍拡競争の中止と、原子力の平和利用を世界に呼びかけた。また、アメリカがこれまで機密情報として取り扱っていた原子力技術を、平和利用に供する目的であれば、他国に向けて積極的に開示し、技術支援を進めていく方針を打ち出した。その後、本宣言を契機として、1957年、国際原子力機関（International Atomic Energy Agency: IAEA）が設立された。

こうして、アメリカの対外原子力政策は、それまでの秘密主義から一転して国際協力主義へと変わり、原子力平和利用と発電用原子炉開発の道が拓かれた。

2.4.2 発電用原子炉の炉型選定と「原子炉物理」の役割

アメリカでは、第二次世界大戦前後における圧倒的な国力と自由経済体制のもとで、原子爆弾の開発だけでなく、発電用原子炉開発においても世界を牽引した。他国では、低コストで手堅い技術をもとに開発せざるをえなかったが、アメリカでは豊富な国力により、複数の技術オプションの得失を分析し、その中から経済性の観点で最も優れたものを選択することができた。アメリカはエネルギー資源にも恵まれており、発電用原子炉の早期実用化に迫られていなかったため、開発対象を初期段階で限定することなく、膨大な技術オ

プシオンを比較・検討することができた。

政府主導で開発が推進された国々では国産技術の保護が前提とされたのに対し、アメリカでは初めから民間企業が開発を担った。自由経済市場の厳しい競争原理のもとで膨大な技術オプションがふるいにかけられ、市場が客観的に選ぶ少数の技術が生き残った。その結果、後述する軽水炉を軸に、発電用原子炉の開発が推進された。

原子爆弾と発電用原子炉の開発系譜はまったく異なるものの、アメリカでは、マンハッタン計画においてウラン濃縮技術が確立済みであったことも、他国より優れた技術を早期に開発できた要因であった。濃縮ウランは核分裂しやすい優れた燃料であることから、これを用いることで、減速材や冷却材に用いるべき物質の選択の幅が広がった。その結果、減速材として、人類がその特性を熟知した普通の水（重水との対比で軽水と呼称）を用いることが可能となった。

これに対し、イギリスやフランスではウラン濃縮技術をもたなかったため、燃焼効率の悪い天然ウランを用いざるを得なかった。その場合、減速材としては性能が極めて高いもの（中性子をよく減速して核分裂を促し、中性子の吸収も少ないもの）を採用する必要があることから、その選択肢は重水や黒鉛に限られ、経済性の観点で軽水炉より優れた炉型を見出すことはできなかった。

初期の発電用原子炉開発の根幹は、膨大な燃料・減速材・冷却材候補の中から、実用化の観点で最適な組み合わせを選択すること（炉型選定）にあり、**原子炉物理**は、その中核を担った。この大きな潮流の中で、原子炉物理の技術基盤それ自身が確立されていった。ここで、原子炉物理の技術基盤とは、(i)原子炉内で中性子が従う基礎方程式（ボルツマン方程式の応用）、(ii)ボルツマン方程式の数値解法（計算手法の開発）、(iii)数値解法に合わせた計算機技術、(iv)核データライブラリ等が挙げられる。

2.4.3 発電用原子炉概念の誕生

ウィスコンシン大学のファリントン・ダニエルズ（Farrington Daniels）は、シカゴ大学冶金研究所の所長を務めた後、発電用原子炉の概念を創出した。1946年、この提案が受け入れられ、オークリッジのクリントン研究所で本格的に研究が開始された。エンリコ・フェルミらによる「シカゴ・パイル」と同様、ダニエルズの提唱した原子炉は「ダニエルズ・パイル」と呼ばれ、アメリカにおける発電用原子炉開発の出発点となった。

ダニエルズ・パイルは、約 1,200°C の高温条件で稼働し、減速材として酸化ベリリウムが、冷却材としてヘリウムガスが採用された。これは、極めて高難度の技術に基づく原子炉概念であり、考案時は未解決の技術課題が山積していた。その後、本計画は中断されることとなったが、本計画を通じて、原子力に関する膨大な知見が戦後の技術者らに継承されていった。本計画には、WH 社の技術者や、潜水艦用原子炉の開発を行った海軍の技術者らも参加しており、その後誕生することとなる加圧水型軽水炉（PWR）の技術基盤構築に重要な役割を果たした。

2.4.4 増殖炉概念の誕生

発電用原子炉の開発がシカゴ大学冶金研究所（後のアルゴンヌ国立研究所）とクリントン研究所（後のオークリッジ国立研究所）で開始されると、ウラン資源の有効活用が最も重要な技術課題として掲げられた。当時、世界のウラン資源量は極めて少ないと考えられていたため、ウラン資源を有効に活用できる技術が、その将来性（息の長さ）に直結すると考えられるようになった。

ウラン資源を最も有効に活用できるのが、「増殖炉」と呼ばれる原子炉概念であることは、当時既に明らかにされていた。天然ウランの 99.3%を占める U-238 に中性子を吸収させ、これを効率的にプルトニウムに変換することができるならば、机上の計算では、すべての天然ウランを燃料として活用できることになる。この技術を実用化することは決して容易ではないが、原子炉をうまく設計できれば、最初に入れた燃料よりも多くの燃料（プルトニウム）を生成することができる。この原子炉概念は、燃料が増えるという意味で「増殖炉」と呼ばれ、「夢の原子炉」または「無尽蔵のエネルギー源」ともいわれた。

2.4.5 加圧水型軽水炉概念の誕生

発電用原子炉開発の初期段階では、アメリカにおける多くの科学者が増殖炉の概念に着目していた。アルゴンヌ国立研究所では、液体金属ナトリウムを冷却材とする「高速増殖炉」(Fast Breeder Reactor: FBR) を有望視し、オークリッジ国立研究所でも増殖炉の研究が進められていた。その後、オークリッジ国立研究所では、アルゴンヌ国立研究所の考案した増殖炉に勝る炉概念を見出せていなかったため、以前から研究されていた、中性子を減速させ、核分裂を促進する熱中性子炉に再び目を向けるようになった。

熱中性子炉の最も基本的な構成要素としては、核分裂反応により熱エネルギーを発生させる「燃料」、核分裂を促すために中性子を減速させる「減速材」、燃料から発生した熱を取り出す「冷却材」があり、各構成要素にどのような材料を適用するかが大きな課題であった。

原子力開発の初期段階における燃料としては、核分裂のしやすい U-235 の割合が低い天然ウランしかなかった。また、天然ウランを利用して核分裂連鎖反応を持続させ、原子炉の運転を継続する、すなわち臨界状態を維持するためには、重水または黒鉛を減速材として用いる必要があった。重水は中性子減速能力が高い一方、非常に高価であるため、商業化を目的とした発電用原子炉への適用に際してはコスト面で不利であった。また、黒鉛は重水に比べてはるかに安価である一方、十分な減速能力を得るには大量の黒鉛が必要となるため、原子炉の高出力化（大型化）に限界があった。

重水製造技術等、高い技術力を有していた欧州では 20 世紀中盤、自国由来の独自技術の活用を重視し、天然ウラン燃料・重水減速炉路線での原子力開発を主軸としていた。この間、圧倒的な予算・人材を投資して原子力開発を進めていたアメリカは、核分裂のしやすい U-235 の割合を高めるためのウラン濃縮技術を確立し、減速材として重水や黒鉛を用いることは、もはや必須要件ではなくなった。

この点に着目したオークリッジ国立研究所のアルビン・ワインバーグ (Alvin Weingerg) は、安価で使い方も熟知された普通の水 (軽水) を減速材として用いることを考えた。軽水は熱伝達特性が良く、冷却材を兼ねることも相まって、コスト・取り扱い・設計のいずれの観点でも有利になることが見込まれた。その結果、濃縮ウラン燃料・軽水減速炉=軽水炉の概念が誕生した。

水は温度が上昇して沸騰すると、水と蒸気が混合して複雑な挙動を示すことから、解析により予測した通りの性能が出るかについては不確かな要素が多く、原子炉を安定して制御することは難しいと考えられていた。そこでワインバーグらは、水を沸騰させずに温度を上げればよいとの着想に至り、水の圧力を高くし、高温・高圧の液体状にして用いればよいとの結論に達した。ここに、世界中で最も多く普及することになる加圧水型軽水炉 (PWR) の概念が誕生した。

2.4.6 潜水艦用原子炉の開発

アメリカ海軍のハイマン・リッコーバー (Hyman Rickover) は、アメリカ初の発電用原子炉の実験炉を目指していたダニエルズ・パイル計画に参画していた。この計画の中で、リッコーバーは、原子炉が潜水艦用の動力源として極めて望ましいことに気づいた。第二次世界大戦後、東西冷戦下において、潜水艦は重要な戦略的軍事力であったため、その性能向上として潜水時間の延長が強く望まれていた。原子炉を動力源にできれば、燃料交換が1年以上不要となり、燃料に酸素も必要としないことから、潜水時間を飛躍的に伸ばすことができると考えられた。

その後、リッコーバーは、核分裂の発見後間もない1930年代末に海軍のロス・ガン (Ross Gunn) が既に同様の点に着目し、1945年には原子力潜水艦の開発計画書まで作成していたことに気づいた。これにより、リッコーバーは自らの着想を確かなものにする、強力なリーダーシップと並外れた政治的センスを発揮し、海軍と原子力委員会の双方に潜水艦用原子炉の開発を目的とした組織を立ち上げた。リッコーバーは双方の組織のトップに就任し、潜水艦用原子炉の開発にまい進した。

潜水艦用原子炉の開発にあたり、リッコーバーはアメリカの2大重電メーカーであるWH社とGE社に、原子炉概念の提案を依頼した。その際、リッコーバーは重要な条件として、(i)潜水艦内に搭載することからコンパクトであることと、(ii)旧ソ連との軍備拡張競争の中で一刻も早く実用化可能な技術であることの2点を要求仕様として提示した。その結果、天然ウラン燃料・黒鉛減速炉は(i)を満たせず、高速増殖炉については実用化の観点で課題が山積しており(ii)を満たせないことから、両炉型は選択肢から外れた。

当時、WH社は多くの技術者をダニエルズ・パイル計画に参画させていた経緯から、PWRの研究で先行するオークリッジ国立研究所の研究者らと技術交流を深めていた。その自然な流れから、WH社はオークリッジ国立研究所の支援を得て、PWRを提案する方針とした。ただし、リッコーバーの提示した(i) (コンパクトさ) を満たすため、燃料については高濃縮ウランを用いることとした。

一方、GE 社は、将来の発電用原子炉の本命と考えられていた高速増殖炉の概念を基礎としつつ、リッコーバーの提示した(ii) (早期の実現性) を満たすための炉型の見直しを進め、高速中性子よりも取り扱いの容易な中速中性子を用いることとした。一方、冷却材については(i) (コンパクトさ) を重視し、性能のよい液体金属ナトリウムを用い、高速増殖炉の変形と言える中速増殖炉を提案する方針とした。

リッコーバーにとって、WH 社の PWR も、GE 社の中速増殖炉も、ともに十分魅力的でありつつ、いずれの炉型も長所と短所をもち合わせていた。PWR の短所である加圧条件の取り扱いについては、技術的な観点から短期的に解決できるものであった。一方、中速増殖炉の短所であるナトリウムの取り扱いについては、ナトリウムと水の接触による爆発の危険性が化学的に根本的なものであり早期解決が困難であったため、最終的には PWR が採用された。

WH 社の PWR を搭載した世界初の原子力潜水艦であるノーチラス号 (Nautilus) は、1954 年 1 月に進水し、翌 1955 年 1 月 17 日、航海試験に成功した。潜水艦用原子炉の開発で得られた膨大な技術的知見は、WH 社にとって何にも代えがたい財産として蓄積され、その後の同社における原子力発電ビジネスに大きく貢献した。

2.4.7 世界初の商業用原子炉の運転開始

1953 年、潜水艦用原子炉の開発を成功に導いたリッコーバーは、航空母艦用原子炉の開発計画を立ち上げた。その後、朝鮮戦争への財政負担の増大を背景にこの開発は中止されたが、間髪を入れず、リッコーバーは陸上用の大型発電炉の開発計画を立て、その予算化に成功した。リッコーバーは、炉型選定において、潜水艦用原子炉の開発を通じて実績のある PWR を採用し、WH 社が開発を担当した。

このプラントは、ペンシルバニア州の SHIPPINGPORT (Shippingport) に建設されることとなり、SHIPPINGPORT 原子力発電所と呼ばれた。陸上発電用原子炉の開発においては、潜水艦用原子炉の開発過程で蓄積された膨大な PWR の技術データが活用された。ただし、潜水艦用の PWR ではコンパクト化を重視して高濃縮ウランが用いられたが、陸上発電用では経済性を重視し、濃縮コストの低い低濃縮ウランが採用された。これに合わせて燃料仕様が抜本的に見直され、今日まで用いられてきた酸化ウラン燃料と、その被覆管材料としてジルカロイ合金が新たに開発された。

1957 年 12 月、SHIPPINGPORT 原子力発電所は、アメリカ最初の原子力発電所として商業運転に成功し、これが世界初の商業用原子炉となった。SHIPPINGPORT 原子力発電所の運転開始を皮切りに、原子力発電時代への道が拓かれ、メーカーとして PWR 技術を蓄積してきた WH 社は PWR の導入にまい進していった。

2.4.8 沸騰水型軽水炉概念の誕生

1952 年、アメリカの原子力委員会 (Atomic Energy Commission: AEC) は、民生発電用原子炉開発計画を発表した。本計画の中で、「PWR」、「BWR」、「FBR」、「ガス冷却黒鉛減速

炉」、「均質炉」の5つが、至近の開発対象に選定された。その後、政府の予算削減要求に応じて対象炉型を1つ減らす必要が生じたことから、PWRとBWRが軽水炉という点で共通であることを鑑み、開発の遅れていたBWRが計画からいったん除外された。

その後、1954年に原子力法が改正され、再度、開発対象炉型が拡張されることとなった。その間、アルゴンヌ国立研究所において、BWRの炉内で生じる沸騰現象が当初懸念された原子炉の不安定化にはつながらないことが実証され、BWRは再び開発対象炉型に選定された。当時、GE社がBWR開発に本格参入しはじめていたこともあり、BWRの開発は一挙に進展し、市場に導入されることとなった。

1962年、アメリカ政府—原子力委員会の発電用原子炉開発計画において、PWR、BWR、FBR、ガス冷却黒鉛減速炉の4つが、商業化の観点から現実的な原子炉に選定された。その後、ガス冷却黒鉛減速炉は、発電効率を高めるために温度を上げる改良が進み、以後、「高温ガス炉」と呼ばれるようになった。

上記4炉型のうち、FBRと高温ガス炉については根本的な技術課題の解決に時間を要することが見通されるようになったため、長期的な開発計画の中に位置づけられることとなった。その結果、すぐに商業化できる発電用原子炉としてはPWR、BWRのみが残った。軽水炉が本命の炉型として残った大きな理由は、水が(i)人類の最も使い慣れた液体であり、(ii)安価であり、(iii)減速材・冷却材双方の観点から優れた性質をもっていたためである。また、潜水艦用原子炉の開発を通じてPWRの開発が圧倒的に先行していたことも、最後に軽水炉が残った理由の1つに挙げられる。

2.4.9 アメリカ以外の国における発電用原子炉開発

アメリカでは複数の炉型を比較・検討することにより、最終的に軽水炉を商業化の本命と位置づけたが、アメリカ以外で原子力開発の自主化を推進する国々では、軽水炉と異なる炉型を軸に開発が進められた。

カナダでは、隣国アメリカとは異なる独自路線を貫き、天然ウラン・重水減速炉のCANDU炉を開発し、発電用原子炉として実用化した。

旧ソ連では、PWRと独自技術による沸騰水型軽水冷却黒鉛減速炉(RBMK)の2炉型を発電用原子炉として実用化した。なお、RBMKは極低出力で不安定になり、一度事故が起こると大事故につながりかねないとして、アメリカとイギリスでは採用が見送られた。旧ソ連では1986年、このRBMK技術を用いた**チェルノブイリ原子力発電所**(Chernobyl Nuclear Power Plant)で事故を起こしており、事故後、この炉型は採用されていない。

フランスでは、ジョリオ・キュリーらが重水を用いた核分裂研究に取り組んできたこともあり、重水の取り扱いに習熟していた。重水自体はノルウェーから入手できたこともあり、当初は天然ウラン燃料・重水減速炉の開発が推進されたが、十分な量の重水を確保できなくなったため、重水減速炉の開発は中止された。その後、もう1つの優れた減速材である黒鉛を用いた天然ウラン燃料・黒鉛減速炉が採用されたが、最終的にはアメリカ製軽水炉の導入に舵を切ることとなった。

2.4.10 石油危機に伴う原子力発電利用の進展

1973年10月、第4次中東戦争が勃発すると、機を同じくして第1次石油危機が発生し、石油価格が高騰した。政治的に不安定な中東の石油産出国は、石油供給先に対して石油を盾に強い発言権を行使し始めた。国内に十分なエネルギー資源をもたないフランスは、このような不安定な状況に鑑み、原子力発電所を増設する方針を打ち出し、フランス電力公社（EDF）は今後の新設発電所をすべて原子力発電とする方針を打ち出した。

フランスの原子力産業界は、石油危機を起点とした原子力発電所増設の流れの中で2つの賢明な策を講じることで、石油危機を追い風に変えた。第1に、メーカーであるフラマトム社（Framatome）がWH社と対等な技術力を蓄積してきたことで、対等なパートナーシップ契約を結ぶことが可能となり、アメリカに縛られずにPWRの開発にまい進することができた。第2に、設計が同一のプラントを1つのサイトに複数基建設する「プラントの標準化」により、経済性を向上させることができた。通常は、個々の発注主である電力会社が配置やサイズ等について個々の要求を出すことから、合理主義の国であるアメリカですら、標準化が実を結ぶことはなかった。一方、フランスは電力会社がEDF1社しかなく、かつ、それが国営企業であったことから、標準化による経済性の向上に成功した。フランスは幸運にも、軽水炉への切り替えを第1次石油危機の前に完了していたため、石油依存体質から原子力利用への移行を円滑に推進することができた。

一方、イギリスでは、一時期5つのメーカーが乱立し、各メーカーにプラント建設が万遍なく発注されたことが一因で技術が拡散した結果、原子力開発においてアメリカやフランスの後塵を拝することとなった。炉型選定においても、マグノックス炉（マグネシウム合金を燃料被覆管に採用した炭酸ガス冷却黒鉛減速炉）、改良型ガス炉、蒸気発生重水減速炉と、国産技術路線を突き進みつつも炉型が大きく変遷し、軽水炉導入への方針転換までに時間を要することとなった。

イギリスの原子力産業界は、軽水炉路線に転換した後も苦難の時期を過ごした。軽水炉が建設される予定だった1980年代初期は、第2次石油危機後の経済不況でエネルギー需要が伸びず、石油危機の教訓として省エネルギー化が進められたことも相まって、電力供給が過剰になり始めた。また、北海における豊富な油田の発見が決定打となり、新規の原子力発電所を建設する必要性がなくなった。さらに、1979年のスリーマイル島原子力発電所事故（Three Mile Island accident: TMI accident）と、1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故により、軽水炉開発を前にして、原子力発電の是非が問われることとなった。

【コラム】大阪万博に届いた「原子の灯」

1953年のアイゼンハワー大統領による原子力平和利用宣言を機に、日本政府は原子力発電所の開発体制を確立していくこととした。1954年3月、改進黨（当時）の中曾根康弘らが原子力開発予算を国会に提出し、1954年度予算に計上された。当時の予算額2億3500万円はウラン235（U-235）にちなんだものであったといわれている。

その後、日本は高度経済成長期に入り、原子力開発に関する官民一体の取り組みが進んだ。それまで「次世代の夢」であった原子力発電は、「現実的」かつ「先進的」な1つの電源になりつつあった。当時、子供たちが読む漫画本の中では原子の力で動く科学の子「鉄腕アトム」が活躍しており、この時代における原子力開発の機運を伺い知ることができる。

このような時代背景のもと、関西電力は、1970年に大阪で開催される「万国博に原子の灯を」を合言葉に、美浜原子力発電所1号機の建設を開始した[9]。工事は順調に進み、1970年1月に完成、同年7月29日に臨界に到達した。それから間もない8月8日午前11時過ぎ、1号機から送られた約1万kWの「原子の灯」は無事万博会場に届き、電光掲示板を通じて一般の来場者たちにも知らされた。大阪万博の開催は世界の注目を集め、大阪府千里丘陵の会場には約半年の会期中に6,400万人を超える人々が押し寄せた。

2.5 原子力事故（1970～2010 年代）[3,4]

【この節のポイント】

- ・ 20 世紀後半から 21 世紀初頭にかけて、いくつかの原子力事故が発生した。
- ・ 特に重大な原子力事故は、スリーマイル島原子力発電所事故、チェルノブイリ原子力発電所事故、福島第一原子力発電所事故であり、これらの事故要因は各々全く異なるものの、事故の経験とその後の対応から教訓とすべき点は多い。



図 2-5 福島第一原子力発電所事故

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%A6%8F%E5%B3%B6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E5%8E%9F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E7%99%BA%E9%9B%BB%E6%89%80%E4%BA%8B%E6%95%85>)

20 世紀中盤において発電用原子炉の開発・利用が急速に進展し、その恩恵が享受され始める一方、20 世紀後半からは、そのリスク＝原子力事故が現実のものとして発生し、発電用原子炉利用の是非が度々問われることとなった。

原子力事故の要因は、原子炉の設計上の欠陥、運転操作中のヒューマン・エラー等、さまざまなものがあるが、結果として事故が発生したという点では同じである。原子力事故の影響度合いとしては、国際原子力事象評価尺度（International Nuclear and Radiological Event Scale: INES）により、レベル 0～7 までの 8 段階で評価され、レベル 1～3 が異常事象（incident）、レベル 4～7 が事故（accident）とされている。

本節では、発電用原子炉の事故に分類される事例として、スリーマイル島原子力発電所事故、チェルノブイリ原子力発電所事故、福島第一原子力発電所事故（図 2-5）を挙げ、原子力事故の経験とその後の対応を解説する。

2.5.1 スリーマイル島原子力発電所事故

1979年3月28日、アメリカのスリーマイル島原子力発電所2号炉（TMI-2）で燃料溶融事故が発生した。本事故は INES レベル5（より広範な影響の事故）に分類される。

本原子炉は、電気出力 96 万 kW の PWR である。97%出力運転中、二次系の軽微な故障が原因でポンプとタービンが停止し、一次系の温度と圧力が上昇した。その後、加圧器逃し弁が開き一次系の圧力の上昇が抑制されたが、圧力が低下した後も弁は熱により開固着の状態となった。これにより一次冷却材が漏出・沸騰し、炉心水位が低下した結果、燃料溶融に至った。炉心水位低下の要因は、加圧器の水位計を確認した運転員が、原子炉圧力容器には十分水があるものと考え、過剰給水を警戒して炉心内の冷却水を注入する緊急炉心冷却装置を手動で止めてしまったことにあった。当時、沸騰する泡が吹き上がり、水位計が水位を実際よりも高く表示しており、これを誤表示と見抜けなかったことが、本事故の結末を決定づけた。

事故後、溶融燃料（燃料デブリ）は原子炉容器内に留まったものの、燃料デブリの取り出しや放射性廃棄物の処理も含めたサイトのクリーンアップには、多額の費用と期間が必要とされた。取り出された燃料デブリと使用済燃料はキャニスターに封入され、アイダホ原子力研究所への輸送を経た後、燃料貯蔵プールに移された。その後、独立した使用済燃料貯蔵施設の水平乾式貯蔵モジュールに移送された。現在、燃料デブリを含め、全燃料の99%が回収されたと推定されている。

放射性廃棄物については、処理・処分に向けて検討が進められている。また、廃止措置については、TMI-1 の廃止措置と同時に実施する計画であり、実際の作業は今後 30～50 年後と想定されている。この間、主要な放射線源であるセシウム 137 とコバルト 60 は約半分に減衰するため、解体や除染作業を合理的に行うことができると考えられている。

2.5.2 チェルノブイリ原子力発電所事故

1986年4月26日、旧ソ連（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所4号炉で燃料溶融事故が発生した。本事故は INES レベル7（重大事故）に分類される。

本原子炉は、電気出力 100 万 kW の黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉（RBMK）である。外部電源喪失を想定した試験中、運転ミスにより炉心溶融と水蒸気爆発が発生し、炉心が大規模に損傷した。炉心損傷に伴い、大量の放射性物質が外部に放出され、旧ソ連国内にとどまらず、欧州各国にまで放射性物質が放出されるに至った。ここでは、運転における数多くの判断の誤りや手順の逸脱があった。その中で最も重大な誤りは、想定していたものよりもずっと低い炉出力で試験を開始したこと、炉出力を試験条件まで低下させる際、試験開始の指示が遅れたことにより、キセノン蓄積に起因して低下していく炉出力を補償するため、安全規則を逸脱して制御棒を引き抜いたことであった。挿入された制御棒がわずか6本となった状態で試験が開始され、低出力であったがゆえに試験開始後に超臨界となり、出力が急上昇した際に制御棒は全挿入されたものの、挿入完了までに20秒はかかるため、炉停止には間に合わなかった。その結果、低出力で自己制御性をもたない特性と相

まって、原子炉出力の急上昇を引き起こすこととなった。

事故後、原子炉には封じ込めのためのコンクリートやほう素が大量に投入され、石棺状態で管理されている。また、本発電所から 30 km 圏内は立入禁止区域となっている。石棺そのものも老朽化が進行していることから、石棺を覆うシェルターが建設され、2016 年 11 月に設置が完了した。シェルター建設後も、本原子炉は依然として安定化に向けた作業の段階にある。今後、シェルターを含めたシステム全体の安全性を向上させるとともに、放射性廃棄物の処理・処分を進めていくことが検討されている。

2.5.3 福島第一原子力発電所事故

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し、地震で発生した津波により、福島第一原子力発電所（1F）で炉心溶融、水素爆発、放射性物質の外部への大量放出が発生した。本事故は INES レベル 7（重大事故）に分類される。

1F には 6 機の原子炉(BWR)があり、電気出力は 1 号機が 460 MW、2～5 号機が 784 MW、6 号機が 1,100 MW である。事故時の状況は原子炉ごとに異なっている。地震発生時、1～3 号機は運転中であり、緊急停止により停止モードに入り、崩壊熱除去システムが動作中に津波が襲来し、全電源喪失などの重大な事態に陥った。4～6 号機は定期検査のため、停止中であった。

地震発生時に運転中であった 1～3 号機は地震動を検知し、自動的に炉心部に制御棒が挿入され、核分裂反応が停止された。すなわち、原子炉を安定な停止状態にするために必要とされる「止める」「冷やす」「閉じ込める」のうち、「止める」については成功した。しかし、原子炉に設置されている「冷やす」ための装置が電源を喪失し、そのすべてが使用できなくなった結果、「冷やす」＝崩壊熱を除去することに失敗し、燃料温度の上昇により燃料が破損した。燃料の破損により、燃料中に蓄積されていた放射性物質を「閉じ込める」こともできなくなり、放射性物質を原子炉外に放出する重大事故をもたらした。その結果、周辺地域を含め、社会に深刻な影響を及ぼしている。

1 号機では、津波によりすべての電源設備が浸水被害を受け、その機能を喪失した。その結果、「冷やす」「閉じ込める」に失敗し、大量の放射性物質を放出する事故となった。また、事故時に発生した水素により水素爆発を起こし、原子炉建屋の損傷にまで至った。

2 号機では、1 号機と同様にすべての電源機能を喪失したが、直流電源喪失前に原子炉隔離時冷却系ポンプ（原子炉で発生する蒸気を用いてポンプを回し、注水する装置）が起動したため、運転が継続され、3 月 14 日までの約 3 日間、「冷やす」機能は維持された。しかし、この間に電源設備を復旧することができなかったため、最終的には「冷やす」「閉じ込める」に失敗した。2 号機では、1 号機の水素爆発時に開放されたブローアウトパネル（破裂板式安全装置）の開口部から事故時に発生した水素が放出されたため、水素爆発と、それによる原子炉建屋の大規模損壊は免れた。ただし、同開口部から大量の放射性物質が放出された。

3 号機では、交流電源を喪失したものの、直流電源については喪失を免れたため、3 月

12日まで「冷やす」機能が維持された。しかし、この間に交流電源を復旧することができなかったため、最終的には「冷やす」「閉じ込める」に失敗した。3号機で発生した水素は、3号機の原子炉建屋を水素爆発により損傷させただけでなく、隣接する4号機へと接続された配管を通じて流れ込み、4号機の原子炉建屋をも損傷させた。

【コラム】 チャイナ・シンдрローム

1979年3月16日、原子力発電所の事故をモチーフとした映画「チャイナ・シンдрローム」がアメリカで公開された。本映画のタイトルは、「炉心が溶融し、高温の溶融燃料が原子炉の底を突き破って地下にもぐり、地球の反対側の中国にまで到達する」という、ブラック・ユーモアに拠る。この映画の公開から2週間後の同月28日、スリーマイル島原子力発電所事故が発生した。

また、1995年11月15日、アニメ・新世紀エヴァンゲリオンの第7話「人の造りしもの」が日本でテレビ放送された。本放送では、核分裂炉を動力源とした人型兵器が暴走するストーリーが展開される。この放送から3週間後の12月8日、もんじゅナトリウム漏えい火災事故が発生した。なお、もんじゅの火災事故はスリーマイル島原子力発電所事故やチェルノブイリ原子力発電所事故とは性質の異なる事故であり、INES上はレベル1（逸脱）に分類される。

「チャイナ・シンдрローム」も「エヴァンゲリオン」も、大事故寸前の「万事休す」というタイミングで、原子炉の爆発が食い止められるストーリー展開となっている。しかし、現実に事故が起きれば、映画のような展開になるとは限らない。原子力利用においては、過去の原子力事故の経験とその後の対応を教訓とし、何にも増して「原子力安全」が最優先されるべきである。この考え方は、いかに原子炉の安全性能が高められた段階においても、将来にわたり揺らぐことのない「基本原則」である。

【コラム】 JCO 臨界事故[3]

1999年9月30日、東海村のJCOで臨界事故が発生した。本事故はINESレベル4（限定的な影響の事故）に分類される。本事故は、いわゆる原子炉の事故ではなく、スリーマイル島原子力発電所事故やチェルノブイリ原子力発電所事故とは性質が異なる。このため、本筋の説明からは割愛したが、日本で初めて被ばくによる死亡者を出した事故として記憶すべきものである。

JCO 臨界事故は、高速増殖炉の実験炉である「常陽」の核燃料加工の最終工程で、不適切な手順に基づく作業により発生したものであり、多量の中性子線とガンマ線を被ばくした作業員2名が死亡した。

事故当日、作業員は、常陽向けにウラン濃縮度が18.8%に高められた硝酸ウラニル溶液を、正規のマニュアルとは異なる裏マニュアルに沿って、ステンレスバケツで運び、他の容器に移し替えた。また、この溶液を、臨界にならない細長い形状の貯塔容器に移して均質にすることになっていたが、さらなる効率化のため、中性子漏れの少ない円筒形状の沈

殿槽（内径 45 cm、高さ 60 cm）の中に、ステンレスバケツで溶液を移し替える手順に変更した。この沈殿槽は、冷却水入りのジャケットで覆われていた。

移し替えの作業中、約 16 kg の硝酸ウラニル溶液を沈殿槽に注ぎ終わった瞬間、臨界事故が発生した。その瞬間、作業員は溶液の中を青白い光が走るのを目撃しており、チェレンコフ放射に類似した発光現象であったと考えられている。

本事故の要因は、「バケツから円筒容器に移し替えたこと」、「ウラン濃縮度が 18.8% と通常の燃料よりはるかに高かったこと」、「沈殿槽の外部を覆っていた冷却水が中性子反射体の役割を果たしたこと」の 3 条件が重なったことにより、核燃料が臨界量を超えてしまったことにある。「臨界質量」「ウラン濃縮度」「核分裂性核種」「中性子漏れの少ない形状」「中性子反射体」といった、「原子炉の物理」に基づく臨界事象や臨界量に対する教育を徹底し、これらの基礎知識を十分に浸透させていれば、事故の根本要因である誤った裏マニュアルの作成や作業の効率化（省力化）にはつながらなかったものと考えられる。

2.6 福島第一原子力発電所事故後の原子力開発（2010年以降）[3,4,5]

【この節のポイント】

- ・ 2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故以降、世界各国で原子力開発政策が見直されつつある。
- ・ 世界的なエネルギー需要の増加や地球温暖化防止対策の観点から今後も原子炉を利用していくためには、原子力安全の向上に資する不断の技術開発が必要であり、「安全性」を大前提に、「経済性」や「運転性」を高めた次世代原子炉の開発が進んでいる。
- ・ 原子力開発とは、廃止措置技術までを含めた開発であり、福島第一原子力発電所の廃止措置においては、燃料デブリ取り出しをはじめ、「原子炉の物理」に係る技術基盤が果たすべき役割は益々高まっている。

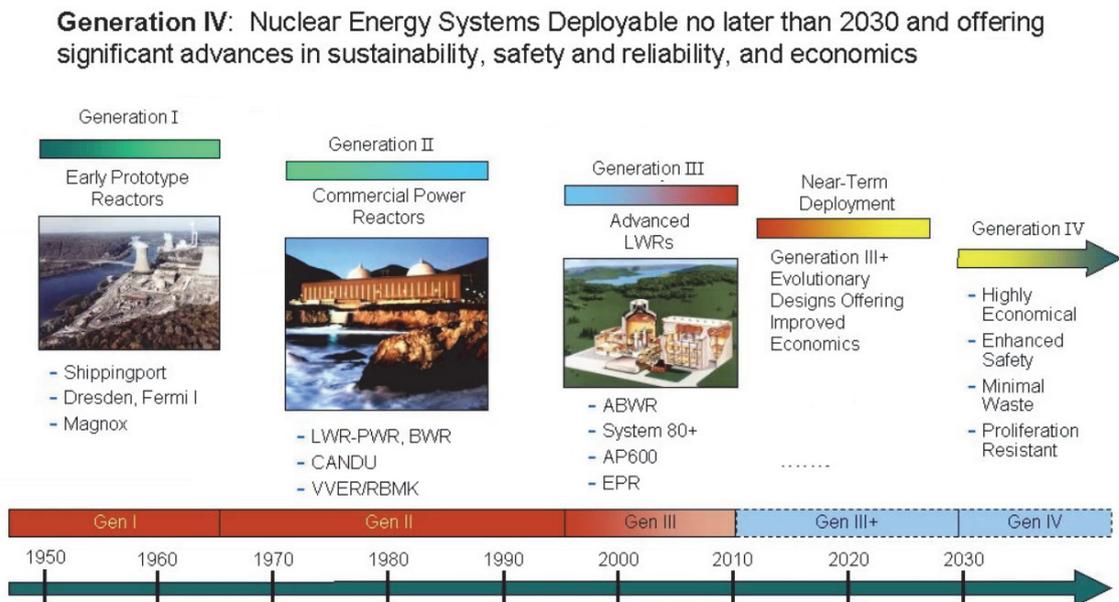


図 2-6 原子炉の世代と変遷

(<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AC%AC4%E4%B8%96%E4%BB%A3%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89>)

21世紀初頭は、世界的なエネルギー需要の増加や地球温暖化防止対策の観点から原子力発電需要が急増し、原子カルネッサンスと呼ばれる時期があった。しかし、原子カルネッサンスは長続きせず、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故を機に、原子力開発は再び苦難の時期を迎えた。世界各国は原子力政策を見直し、原子力利用の廃止を打ち出す国も現れ始めた。

本節では、各国における至近の原子力開発政策をまとめるとともに、今後も原子炉を利用していくにあたり、益々重要となる原子力安全の向上と、それをふまえた次世代原子炉の開発（図 2-6）、廃止措置技術の開発について解説する。

2.6.1 各国の原子力開発政策

福島第一原子力発電所事故後、世界各国で原子力政策を見直す動きがあり、原子力を推進する国の中には、中長期的に廃止する政策をとる国も現れ始めた。しかし、重要なベースロード電源である火力と原子力のうち、火力については地球温暖化問題の根本原因の1つであり、将来的な化石燃料不足と価格高騰のリスクがあることを踏まえると、今後も長期的にベースロード電源として維持するには大きな課題を抱えている。もし、火力と原子力の双方を排除する方向となれば、現段階では発電用エネルギーの安定供給が困難となる。この観点から、世界的には多くの国が引き続き原子力を推進する計画であり、新たに原子力の導入を検討する国も存在する。

地球温暖化ガス排出量ランキングで世界第1位～4位に位置する中国、アメリカ、インド、ロシアでは、それぞれ10基以上の新設を計画している。また、この4か国以外で原子力を引き続き推進する政策をとるのは、フランス、イギリス、フィンランド、ウクライナ、スロバキア、ルーマニアである。さらに、今後のエネルギー需要の拡大を見据え、新たに原子力発電の導入を検討する国としては、バングラデッシュ、トルコ、ベラルーシ、リトアニア、エジプト、ポーランド、サウジアラビア、アラブ首長国連邦が挙げられる。一方、中長期的に脱原子力政策を進める国は、ドイツ、ベルギー、スウェーデン、台湾、韓国である。

日本は、地球温暖化ガス排出量ランキングで世界第5位であり、同時に、消費エネルギーに占める化石燃料の割合でも世界第3位（約95%）となっている。2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画において、原子力が引き続き重要なベースロード電源に位置づけられ、2030年時点における電源構成上の見通しは20～22%程度とされている。本計画では、「3E+S」というエネルギー政策の基本的視点が示されている。すなわち、安全性(safety)を前提に、エネルギーの安定供給(energy security)、経済効率性の向上(economic efficiency)、環境への適合(environment)を図るため、最大限の取り組みを行うという方針が打ち出されている。

福島第一原子力発電所事故を経験した日本の責務は、技術および運用の両面から原子力安全の向上を国際的に発信していく取り組みが求められる。

2.6.2 世界的なエネルギー需要の増加

経済成長に伴い、世界のエネルギー消費量は増加の一途をたどっている。1965年に38億toe(tonne of oil equivalent、原油換算トン)であったエネルギー消費量は、1年あたり2.6%のペースで増加を続け、2011年には123億toeに達した。

エネルギー消費の伸び率は国によって差があり、先進国(OECD諸国)では伸び率が低く、開発途上国(非OECD諸国)で高くなる傾向にある。この背景として、先進国では、(i)経済成長率、人口増加率とも開発途上国と比較して低く留まっていること、(ii)産業構造が変化したこと、(iii)エネルギー消費機器の効率改善等による省エネルギーが進んだこと等が挙げられる。これに対し、開発途上国ではエネルギー消費が単調に増加している。

世界のエネルギー消費量をエネルギー源別にみると、石油の消費量は1971年から1年あたり1.3%のペースで増加を続け、今日に至るまで、エネルギー消費における最大のシェアを誇っている。また、石炭についても発電向けの消費が堅調に増加している。特に近年は、アジア地域を中心に安価な発電用燃料の需要が増加しており、消費量が急速に拡大している。天然ガスは、気候変動への対応が急がれる先進国を中心に需要が伸びており、特に発電用と都市ガス用の消費が伸長している。

一方、原子力（年平均8.6%）と新エネルギー（同8.8%）は消費量の伸び率が最も高くなっている。これは、エネルギー供給の多様化や低炭素化といった課題を解決するためのエネルギー源として、導入が進んだものと考えられる。

2.6.3 地球温暖化に伴う原子力発電需要の増加

世界の平均気温は年々増加し、地球温暖化が進んでいると考えられている。また、温暖化の主要因が、人類の生産活動に起因した二酸化炭素排出であることも明確になりつつある。現在、平均気温は産業革命前に対して1°C近くまで上昇してきており、生態系を含めたさまざまな分野への影響が懸念されている。

2013～2014年に出版された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書によると、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、1950年代以降、観測された変化の多くは数10年～数1000年間で前例のないものであり、その主要因は人間活動であった可能性が極めて高いとされている。

これらの気候変動に対処するため、2015年12月、パリで開催された国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の第21回締約国会議（COP21）でパリ協定が採択され、翌2016年11月に発効された。パリ協定は、京都議定書（1997年採択、2005年発効）以来となる、世界的な温暖化対策の枠組みであり、長期的には産業革命以前比で2°Cを十分下回る1.5°C目標が掲げられている。また、今世紀後半に世界の温室効果ガス排出を正味ゼロとする目標も含まれている。

地球温暖化防止（二酸化炭素排出量の削減）の具体的な方策としては、省エネルギー（社会構造の変化や行動様式の変化を含む）、低炭素化石燃料への転換（石炭・石油→ガス）、二酸化炭素の分離・回収・貯留等が挙げられている。発電中に二酸化炭素を発生させない原子力発電や再生可能エネルギーの利用もその中に含まれている。各々の技術には長所・短所があるため、これら複数の技術オプションを併用した対策が重要であると考えられている。

国際エネルギー機関（IEA）の推計によると、前述の2°C削減目標の達成には再生可能エネルギーの寄与が重要としつつ、原子力発電の拡大についても費用対効果の高い対策であると推計されている。

2.6.4 原子炉の世代と次世代原子炉開発

原子炉は、その開発時期に応じて第1世代～第4世代原子炉の4つに分類され、現在稼

働中の最新炉型が第3世代、現在開発中の炉型が第4世代にあたる（図2-6を参照）。

第1世代原子炉は、1950～1960年代に、主に軍用動力炉から転用された技術に基づいて開発された炉型であり、アメリカの SHIPPINGPORT 原子力発電所等が挙げられる。本世代の原子炉は過酷事故の経験がない。

第2世代原子炉は、1970～1990年代末までに設計された初期の商業用原子炉である。主に軽水炉であり、設計寿命は30～40年、活動寿命は50～60年とされている。初期の第2世代原子炉は減価償却が進み、安価な電力供給にも寄与してきたが、過酷事故を起こしたのも、本世代の原子炉である。

第3世代原子炉は、1990年代後半から普及し始めた第2世代の改良型である。主な改良点は、核燃料技術の高度化、熱効率の向上、安全システムの改善、維持費の低減などである。一般に、設計寿命は60年であるが、活動寿命は120年まで延長できるとされている。また、第3世代原子炉に対し、過去の過酷事故の教訓を反映した「第3世代+」の原子炉もあり、非常用炉心冷却系(ECCS)に受動的な安全設備(パッシブセーフティー、Passive safety)が導入されている。「第3世代+」では、過酷事故対策として、熔融燃料に対するコアキャッチャーの導入、原子炉容器内保持システムの導入、冗長性の強化等が図られている。

第4世代原子炉は、近未来型の原子炉であり、米国エネルギー省が提示しているものである。開発目標としては、高い安全性、核拡散防止性、廃棄物の最小化、建設・運用費の低減などが挙げられており、アメリカ、カナダ、フランス、イギリス、中国、日本等が開発を進めている。炉型としては、超高温原子炉(Very High Temperature Reactor: VHTR)、超臨界圧軽水冷却炉(Super-Critical Water Reactor: SCWR)、ナトリウム冷却高速炉(Sodium-cooled Fast Reactor: SFR)、熔融塩炉(Molten Sault Reactor: MSR)、ガス冷却高速炉(Gas-cooled Fast Reactor: GFR)、鉛冷却高速炉(Lead-cooled Fast Reactor: LFR)の6種が開発対象とされている。

2.6.5 廃止措置技術の開発

寿命を迎えた通常の原子炉の廃止措置は困難な作業であり、時間が掛かり作業工程も煩雑であるが、過酷事故を経験した福島第一原子力発電所の廃止措置は、より一層の困難に直面することが予想される。特に、燃料デブリ取り出しにおいては、燃料デブリの性状推定、放射線強度の評価、臨界評価(未臨界度測定)、デブリ取り出し工法の選択等、経験したことのない多くの課題に直面している。

原子力開発は、原子炉の開発、廃棄物の処理・処分、さらに廃止措置までを完遂して初めて原子力開発であるといえる。「原子炉の物理」の役割は、事故時に原子炉を「止める」ことで、そのすべてが果たされるわけではない。燃料デブリ取り出しの成功に向け、取り出し時の臨界評価へ直接的に貢献する等、その技術基盤が果たすべき役割は益々高まっている。

参考文献

- [1] ジョン・イー・グレー、「原子力の奇跡—国際政治の泥にまみれたサイエンティストたち—」、日刊工業新聞社 (1993).
- [2] エミリオ・セグレ、「X線からクォークまで—20世紀の物理学者たち—」、みすず書房 (2019).
- [3] 國米欣明、「—核分裂発見から80年—原子力のあゆみ」、幻冬舎 (2018).
- [4] 日本原子力学会編、「原子力のいまと明日」、丸善出版 (2019).
- [5] 経済産業省 資源エネルギー庁ホームページ
(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013html/2-2-1.html>)
- [6] 名古屋大学大学院工学研究科 総合エネルギー工学専攻 エネルギー安全工学講座
原子核エネルギー制御工学グループホームページ
(<http://www.fermi.energy.nagoya-u.ac.jp/index.html>)
- [7] 理化学研究所仁科加速器科学研究センターホームページ 113番元素特設サイト
(<http://www.nishina.riken.jp/113/>)
- [8] 日本原子力学会ホームページ「第1回（平成20年度） 原子力歴史構築賞」
(<http://www.aesj.or.jp/awards/2008/historic.html>)
- [9] 関西電力ホームページ「関西電力の歴史 HISTORY02. 日本初の原子力発電営業運転への挑戦」(<https://www.kepco.co.jp/firstcareer/company/project02/>)