

6. 6 原子力エネルギー

20世紀初頭に核物理が大きく進歩し、原子力エネルギー、放射線の科学研究、軍事利用、平和利用（発電、医療）が始まった。

特に、第二次世界戦争後は、核分裂反応から取り出される膨大なエネルギーを発電や熱源に利用しようとする研究開発が進み、米国、ソ連、英国、フランス、カナダ、スウェーデンなど多くの国で原子力発電プラント（nuclear power plant）が開発された。

日本は、第二次世界大戦の敗戦国であり、核開発は中止・禁止されたが、戦後間もない1950年代には、原子力の平和利用を国策とし、原子力発電を推進することを決定した。日本は、唯一の原子爆弾被爆国であり、軍事ではなく平和的エネルギー源として原子力技術を英国や米国から取り入れることを決めた。

1980年代以降、電力需要が大きく増大し、多くの原子力発電所が建設された。安定した安価な電力によって電力多消費型の産業が発達した。

2011年の東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）をきっかけに、東京電力福島第一原子力発電所の複数の原子炉が重大事故を起こした（福島第一原子力発電所事故）。震災の被災地域には、東北電力女川発電所、東京電力福島第二発電所、日本原子力発電東海第二発電所などがあり、地震発生時に全ての原子炉が緊急停止したが、福島第一発電所は、電源喪失などによって停止後の余熱（崩壊熱）の除去に失敗、炉心溶融を起こした。

6基の原子のうち隣接する1～4号機が損壊、放射性物質などが放出された。国際原子力事象評価尺度（INES）によるとレベル7（最も深刻な事故）に分類された。

多くの住民が避難、現場の放射能汚染水問題、原子力発電所の廃止作業（原子炉の廃炉作業）などの課題が解決しておらず、事故の収束には長い年月を要すると思われる。この事故によって、原子力発電の安全性への信頼が失われ、国のエネルギー政策・環境政策・経済政策は、多大な影響を受けた。エネルギー政策全体の中で、原子力発電をどうするのか、今後も大きな国民的議論が続くと思われる。

6. 6. 1 原子力エネルギーの歴史

原子力エネルギーあるいは放射線利用が始まったのは、おそらくレントゲンによるX線の発見（1895年）からである。

初期の量子力学がほぼ完成した1925年に国際放射線防護委員会（ICRP）が設立され、放射線の生物への影響、医学研究が始まり、原子力の利用が始まった。原子核の崩壊が観測され、続いて原子核の核分裂反応が発見された。ドイツ・カイザー・ヴィルヘルム研究所のオットー・ハーン（1879～1968年、ドイツ）とリーゼ・マイトナー（1878～1968年、オーストリア）は、ウランに中性子を照射すると、ウランが分裂し、より小さな原子核に変換されることを発見した（1938年）。

ドイツでは、1933年、アドルフ・ヒトラーが率いるナチスが政権をとり、ユダヤ人であるマイトナーは、研究所の教授職を解任され、さらに1938年に母国オーストリアがドイツに併合されたため、ドイツからの亡命を余儀なくされスウェーデンに逃れた。その年、共同研究者であるハーンが核分裂を確認、ノーベル化学賞がハーンに授与された（1944年）。ナチスの圧力によってマイトナーはノーベル賞を逃したが、彼女の名前はドイツで発見された109番元素マイトネリウムに残った（1982年発見、1997年命名）。

核分裂が発見されてから間もなく、第二次世界大戦の参戦国、ドイツ、日本、米国などで原子爆弾の開発が始まった。残念なことに、原子力エネルギーの平和的利用の前には、原子力の軍事利用があった。

米国は、1942年にマンハッタン計画に着手した。マンハッタンに本部を置くプロジェクトは、オークリッジ、ロスアラモス、ハンフォードのサイトに5千人から8万人の労働者を集めて行われ、アメリカやカナダの大学、研究所、大手民間企業が協力して行われた。原子爆弾の材料となる高濃縮ウランやプルトニウムの生産を実用化、4発の原子爆弾を製造した。その時、ドイツは既に連合軍に降伏していたが、交戦中であった日本に対して2発の原子爆弾が使用された（1945年）。

第二次世界大戦後は、ソ連、英国、フランスが原子爆弾を開発、さらに破壊力を増した水素爆弾などが開発され、米ソの冷戦を背景に、大量の核兵器が製造された。多くの核実験が行われて、地球環境は著しく汚染された。さらに、中国やインドも核兵器を開発した。

核不拡散条約（NPT）や包括的核実験禁止条約（CTBT）などの戦後作られた国際的枠組みによって、過度な軍拡、大規模な核実験は行われなくなり、実戦での使用も抑制されているが、現在もいくつかの国が核兵器を保有している。NPT 批准国では米国、ロシア、英国、フランス、中国が核兵器を保有国、非批准国としては、インド、パキスタン、北朝鮮が核保有を公表している。イスラエルが保有を疑われている。

これまでに多くの国が核兵器開発を行った。第二次世界大戦中の日本、ドイツ（いずれも未完成）、戦後では、イラク、スイス、スウェーデン、ブラジル、アルゼンチン、南アフリカなどに核兵器の開発計画があった。

現在は、国際社会がこれ以上新たな核保有国ができることを認めない枠組み NPT があり、イランの核開発に対して国際的な経済制裁が行われた。イランが開発の大幅縮小、IAEA の査察を受け入れることを決めたため 2016 年からは制裁解除に向かっている。

戦後の、核兵器の開発と同時に、原子力のエネルギーを制御して動力や電力として取り出すための技術開発が進められ、平和利用の道筋もつけられた。

表 6-6-1 に 20 世紀後半からの原子力エネルギー関連の年表を示す。

表 6-6-1 原子力エネルギー関連の年表

年/月	出来事
1925	国際放射線防護委員会（ICRP）設立
1937/7	日中戦争勃発
1933	ドイツでナチス政権が誕生
1938	オットー・ハーン、リーゼ・マイトナーがウランの核分裂反応を発見
1939/9	ドイツがポーランドに侵攻、欧州で世界戦争が勃発
1941/2	グレン・シーボークがプルトニウムを発見
1941/12	日本が英国領マレーと米国ハワイ州を攻撃、ドイツとイタリアが米国に宣戦布告、世界が戦争状態に突入した
1943/7	イタリアが降伏
1944/4	米英加が共同でカナダに重水炉を建設することを決定
1944/5	米 ANL、重水炉が臨界に達した
1944/7	理研、熱拡散法によるウラン濃縮試験 日本海軍、ウランの遠心分離研究開始 米 ORNL、熱拡散によるウラン濃縮工場稼働
1944/9	米、プルトニウム生産炉稼働
1944/12	米、南アのウラン鉱脈を発見
1945/2	米 ORNL、ウランのガス拡散分離に成功 米 LASL、臨界超過事故
1945/5	ドイツが降伏、欧州における世界大戦が終結
1945/6	米 LASL、高濃縮ウラン臨界超過事故

1945/6/11	米、フランクレポート
1945/7/16	米、原爆完成、ニューメキシコ州で世界初の核実験（トリニティ実験）
1945/8/6	米、日本の広島を原爆攻撃
1945/8/8	米 LASL、プルトニウム臨界超過事故
1945/8/9	米、日本の長崎を原爆攻撃
1945/8/10	日本政府、原爆を確認、米国に原爆の使用を抗議
1945/8/15	日本が降伏、第二次世界大戦終結
1945/9/5	カナダ、天然ウラン重水炉が臨界
1945/11	米、原子炉の特許を取得。黒鉛減速ヘリウム冷却炉、重水減速炉、加圧水型重水炉、高速炉 米軍が理研のサイクロトロンを破壊 広島に ABCC（原爆傷害調査委員会）を設置
1945/12	米、原子力の民間管理の法律（マクマホン法） 米英加、国連原子力委員会の創設を提案
1946/1	米、低濃縮ウラン軽水炉の特許 国連、原子力国際管理のための委員会設置を決議
1947/3	米、ウランの輸出を禁止
1947/8	英国、天然ウラン黒鉛減速原子炉が臨界
1948	フランス国内でウランの鉱脈発見
1948/12	フランス、第一号原子炉臨界
1949/4	ソ連、濃縮ウラン原子炉が臨界
1949/8	ソ連、核実験
1949/11	米国 AEC、日本への RI 輸出を解禁
1949/12	米国 LASL、水冷炉で暴走事故
1950/10	オーストラリアで大規模なウラン鉱床発見
1951/1	米国、ネバダで核実験 5 回 米国、マーシャル諸島エニウェトク環礁で 4 回の核実験。エニウェトク環礁は、1948～1962 年の間、核実験場となった。
1951/4	オランダ・ノルウェー合同原子力研究所設立
1951/5	日本放射性同位元素協会設立 九電力会社が設立された。
1951/10	米国、ネバダで 7 回の核実験
1951/12	米国、世界初の原子力発電、100kW
1952/2	英国、核兵器保有を公表
1952/4	米国、ネバダで 8 回の核実験 米国 LASL で高濃縮ウランが超臨界事故
1952/6	学術会議が原子核特別委員会設置（朝永振一郎委員長） 米国 ANL で高濃縮ウランが超臨界事故
1952/10	英国、初の核実験 理研、サイクロトロンの実験開始 欧州 12 ヶ国が原子核研究所（CERN）建設に合意
1952/10	カナダ、CRL で原子炉暴走事故。レベル 5
1953/4	日本学術会議、原子核研究所設立を決定
1953/8	ソ連、初の水爆実験

1954/1	米国、世界最初の原子力潜水艦ノーチラス号進水
1954/2	米国、ビキニ環礁で水爆実験
1954/3	第五福竜丸、米の水爆実験に被災
1954/4	日本学術会議、核兵器研究の拒否と原子力研究三原則（自主・民主・公開）を声明
1954/6	ソ連、世界初の商業原子力発電所運転開始（濃縮ウラン黒鉛減速軽水冷却型 5000kW）
1954/8	米国、民間企業の原子力発電を許可
1955/4	通産省工業技術院に原子力課
1955/6	日米原子力協定調印
1955/10	国連連政治委、原子力平和利用に関する 18 か国共同決議案（国際原子力機関の創設）を可決
1955/12	国連総会、国際原子力機関（IAEA）及び原子放射線の影響に関する科学委員会（国連科学委）の設置を決定
1956/1	フランス、初の原子力発電、3000kW
1956/3	科学技術庁設置
1956/4	日本原子力研究所法公布
1956/5	英国、コールダーホール原子力発電所第1号炉発電開始
1956/10	岡山県三吉鉱山、鳥取県倉吉・小鴨鉱山でウラン採鉱開始、人形峠の埋蔵量は100万トン
1957/2	電力9社、原子力発電計画を決定
1957/5	英国、水爆実験 インドで大規模ウラン鉱床発見
1957/7	国際原子力機関（IAEA）発足 原燃公社、北上山地一帯にウラン鉱発見
1957/9	ソ連のマヤーク核施設で大規模な原子力事故。キシテム事故。公表は1992年以降。レベル6。
1957/10	英ウインズケール第1号プルトニウム生産炉火災、燃料溶融事故。放射性ヨウ素の大量放出。レベル5 国産初のアイソトープ生産（JRR-1炉） 古河電工、金属ウランの製錬試験に成功
1957/11	日本原子力発電(株)発足
1958/4	三菱原子力工業発足。 原燃、人形峠で新ウラン鉱発見
1958/10	学術会議、核融合反応研究の促進を勧告
1958/11	日立製作所日立中央研究所に原子力センター
1959/1	原研・日立・住友金属が共同で棒状ウラン燃料の試作成功
1959/2	日本原子力学会設立
1959/6	神戸製鋼、原子炉用ジルコニウム合金の国産化に成功
1960/4	農林省、ガンマ・フィールド（放射線育種場）を茨城県大宮町に設置
1960/8	理研、濃縮ウラン製造研究用遠心分離機を完成
1960/9	三井金属鉱業、高純度の酸化トリウムを国産化に成功
1960/10	原研、研究炉 JRR-2 臨界
1962/9	国産1号炉 JRR-3（熱出力1万kW）臨界

1963/6	名古屋大学プラズマ研究所発足
1963/7	スウェーデンのオグスタ原子力発電所稼動（発電と暖房の複数目的炉）
1963/8	特殊法人・日本原子力船開発事業団発足
1964/5	IAEA による日本への初めての原子力施設査察
1966/7	日本原子力発電・東海発電所、営業運転開始 日本初の商業発電
1970/3	日本原子力発電・敦賀1号、営業運転開始
1970/11	関西電力・美浜発電所1号炉、営業運転開始。 電力会社による日本初の原子力発電。
1971/3	東京電力・福島第一原発1号、運転開始
1971/12	三菱原子燃料(株)発足
1972/2	日本核燃料開発会社発足
1972/4	関西電力・美浜発電所2号炉、営業運転開始
1974/3	中国電力・島根原子力発電所1号、営業運転開始
1974/5	インドが核実験
1974/7	関西電力美浜1号、蒸気発生器冷却水もれ発生、運転停止 東京電力福島第一2号、運転開始
1974/11	関西電力・高浜原発1号、営業運転開始
1975/10	九州電力・玄海原発1号、営業運転開始
1975/11	関西電力・高浜原発2号、営業運転開始
1976/3	中部電力・浜岡原発1号、営業運転開始 東京電力・福島第一3号、運転開始
1976/12	関西電力・美浜原発3号、営業運転開始 関西電力・美浜原発1号の燃料棒折損事故の3年間の隠蔽が発覚
1977/2	四国電力・伊方原発1号、営業運転開始
1977/10	米国、エネルギー省DOE発足
1978/4	東京電力・福島第一原発5号、運転開始 韓国、初の原発古里1号運転開始
1978/7	新型転換炉・ふげん、送電開始
1978/10	東京電力・福島第一原発4号、運転開始
1978/11	日本原子力発電(株)東海第二発電所運開 中部電力・浜岡原発2号、営業運転開始
1979/3/27	関西電力・大飯原発1号、営業運転開始
1979/3/28	米国・メトロポリタン・エジソン社スリーマイル島（TMI）原発2号機で 大規模事故が発生。レベル5
1979/10	東京電力・福島第一原発6号、運転開始
1979/12	関西電力・大飯原発2号、営業運転開始
1980/3	スウェーデンで原子力開発の国民投票
1981/3	九州電力・玄海原発2号、営業運転開始
1981/8	四国電力・伊方原発2号、営業運転開始
1982/4	東京電力・福島第二原発1号、運転開始
1983/11	アルゼンチン、ガス拡散ウラン濃縮に成功
1984/2	東京電力・福島第二原発2号、運転開始
1984/3	中部電力、北陸電力、関西電力が、珠洲原発の建設計画

1984/6	東北電力・女川原発1号、営業運転開始
1984/7	九州電力・川内原発1号、営業運転開始 オーストラリア、条件付でウランの輸出を許可
1984/8	ウラン積載船モンツイ号沈没事故。コンテナ回収
1985/1	関西電力・高浜原発3号、営業運転開始
1985/6	関西電力・高浜原発4号、営業運転開始 東京電力・福島第二原発3号、運転開始
1985/9	東京電力・柏崎刈羽原発1号、運転開始 フランス、高速増殖炉実証炉スーパーフェニックスが臨界
1985/10	米国、TMI 原発再開
1985/11	九州電力・川内原発2号、営業運転開始
1986/1	フランス、スーパーフェニックスが送電開始
1986/4/26	ソ連、チェルノブイリ原発4号機が過酷事故。レベル7
1986/8	ソ連、IAEA にチェルノブイリ事故報告書を提出
1987/7	日本原子力発電・敦賀2号、営業運転開始
1987/8	東京電力・福島第二原発4号、運転開始。 中部電力・浜岡原発3号、営業運転開始
1987/9	ブラジルで放射性物質の大量汚染事故。ゴイアニア事故、レベル5
1988/12	放医研が重粒子治療装置を建設
1989/1	東京電力・福島第二原発3号炉、再循環水ポンプの故障で2年間停止
1989/2	中国電力・島根原発2号、運転開始
1989/6	北海道電力・泊原発1号、運転開始
1990/4	東京電力・柏崎刈羽原発5号、運転開始
1990/9	東京電力・柏崎刈羽原発2号、運転開始
1990/12	原子力発電をめぐるカリフォルニア州民投票
1991/2	関西電力・美浜発電所2号炉、伝熱管の破断により、緊急炉心冷却装置(ECCS) が作動する事故が発生。レベル2
1991/4	北海道電力・泊原発2号、運転開始
1991/12	関西電力・大飯原発3号、運転開始
1993/1	フランスの原子力シェアが73%に達した
1993/2	関西電力・大飯原発4号、営業運転開始
1993/5	インドでトリウム燃料の原子炉が営業運転開始 ロシア・トムスクー7原子力コンビナートが事故、レベル3
1993/7	北陸電力・志賀原発1号、運転開始 中国、大亞湾1号機が運転開始
1993/8	東京電力・柏崎刈羽原発3号、運転開始
1993/9	中部電力・浜岡原発4号、運転開始
1994/3	四国電力・伊方原発3号、運転開始。九州電力・玄海原発3号、運転開始
1994/8	東京電力・柏崎刈羽原発4号、運転開始
1994/10	朝鮮半島エネルギー開発機構(KEDO)の米朝枠組み合意。 北朝鮮の核開発凍結の見返り。 米国は北朝鮮に軽水型発電炉を供与し、建設完了までは代替エネルギー(重油)を供給。北朝鮮はNPTに留まり、再処理工場および軍事転用可能な黒鉛減速型発電炉を凍結・解体。→2002年破棄

1995/7	東北電力・女川原発 2 号、営業運転開始
1995/8	高速増殖炉もんじゅ・運転開始
1995/12	高速増殖炉もんじゅ・ナトリウム漏洩事故
1996/11	東京電力・柏崎刈羽原発 6 号、運転開始
1997/7	東京電力・柏崎刈羽原発 7 号、運転開始 九州電力・玄海原発 4 号、営業運転開始
1998/3	日本原子力発電・東海発電所、運転終了
1998/5	パキスタンが核実験
1998/10	動燃解体、核燃料サイクル開発機構発足
1998/12	東北電力・東通原発 1 号、運転開始
1999/9	台湾中部地震、送電に被害、原発は無事
1999/10	燃料加工施設 JCO 東海事業所で臨界事故。レベル 4
2001/1	原子力安全・保安院発足
2002/1	東北電力・女川原発 3 号、運転開始
2002/10	北朝鮮の KEDO 合意違反・核兵器用濃縮ウラン計画が発覚。施設の封印と監視カメラが撤去され IAEA の監視ができなくなった。
2003/1	北朝鮮が NPT を脱退。ベルギーが脱原子力法案を可決
2003/3	新型転換炉・ふげん、運転終了
2003/12	中部電力、北陸電力、関西電力が、珠洲原発の建設計画を凍結 東北電力が新潟県巻原発の計画を断念
2004	米国と欧州で原子カルネッサンス。温暖化防止に原子力支持拡大
2005/1	中部電力・浜岡原発 5 号、営業運転開始
2005/2	北朝鮮が核兵器開発を公式に発表
2005/8	宮城沖地震発生。東北電力女川発電所が自動停止
2005/12	IAEA がノーベル賞を受賞
2006/3	北陸電力・志賀原発 2 号、営業運転開始
2006/7	G8 サミット原子力は地球温暖化とエネルギー安全保障に役立つとの見解
2007/1	欧州委員会が二酸化炭素 20%削減目標
2007/6	OECD がドイツに脱原子力政策の見直しを勧告
2007/7	東京電力・柏崎刈羽原発が新潟県中越沖地震を被災。IAEA による事故調査はレベル 0
2008/3	トルコが原子力発電建設の国際入札を開始
2008/5	OECD が、発電用ウランは今後 100 年間十分な量があると報告
2009/12	北海道電力・泊原発 3 号、営業運転開始
2011/1	東京電力・東通原発 1 号炉、建設着工
2011/3	東京電力・福島第一原発が東日本震災を被災。複数の原子炉が続けて過酷事故。レベル 7
2012/9	原子力規制委員会発足

CRL：チョークリバー研究所、ORNL：オークリッジ国立研究所、LASL：ロスアラモス科学研究所、AEC：米原子力委員会、NPT：核不拡散条約、PWR：加圧水型原子炉、APWR：改良型加圧水型原子炉。BWR：沸騰水型原子炉、ABWR：改良型沸騰水型原子炉、GCR：黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉、FBR：高速増殖炉、ATR：新型転換炉、国際原子力事象評価尺度（レベル0から7まで）

1966年に日本原子力発電・東海発電所が営業運転を開始、日本初の商業発電が行われた。1970年に、電力会社の第1号である関西電力・美浜原子力発電所が営業運転を開始した。その後、国内電力需要が大きく伸び、いくつもの原子力発電所が建設され、30年間に約50基の大型原子炉が設置された。

表 6-6-2 原子力関連の略語表

記号		正式名称	内容
ICRP	1925年	International Commission on Radiological Protection	「国際放射線防護委員会」 放射線防護に関する勧告を行う民間の国際学術組織
UNSCEAR	1955年	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation	「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」、アンスケア。被曝の程度と影響を評価・報告する国連の委員会
IAEA	1957年	International Atomic Energy Agency	「国際原子力機関」、国連の自治機関 2005年ノーベル平和賞
OECD/NEA	1958年	OECD Nuclear Energy Agency	「経済協力開発機構の原子力機関」
NRC	1975年	Nuclear Regulatory Commission	アメリカ合衆国原子力規制委員会
INES	1992年	International Nuclear Event Scale	「国際原子力事象評価尺度」IAEAとOECD/NEAが策定
PTBT	1963年	Partial Test Ban Treaty	部分的核実験禁止条約
NPT※	1970年	Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons	核拡散防止条約※ 核軍縮を目的に、5か国（米、口、英、仏、中国）以外の核兵器の保有を禁止する条約
CTBT	1996年	Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty	包括的核実験禁止条約
SALT	1972年	Strategic Arms Limitation Talks	戦略兵器制限交渉 米ソの軍備拡張競争抑制
SALTII	1979年	Strategic Arms Limitation Talks 2	第二次戦略兵器制限交渉
START	1991年	Strategic Arms Reduction Treaty	戦略兵器削減条約、米ロシアの3つの条約

※ソビエト連邦の解体後、ウクライナ、ベラルーシ、カザフスタンの3か国は核保有国となったが、その後、核兵器を放棄してNPTに調印した。南アフリカは1980年代に核兵器を保有していたが、その後放棄してNPTを批准した。

6. 6. 2 原子炉

原子力発電は、原子核の連鎖的核分裂から取り出されるエネルギーを利用した発電である。

原子核の崩壊には、 α 崩壊、 β 崩壊、 γ 崩壊など、不安定な核種の自発的な崩壊過程がよく知られているが、非常に大きな質量を持つ原子核は、2つ以上の核種に分裂する反応（核分裂）を起こす。反応の前後で質量欠損があり、失われた質量に相当する非常に大きなエネルギー（粒子の運動エネルギー、熱エネルギー）が放出される。アインシュタインが特殊相対性理論の中で、 $E = mc^2$ と定式化したように、ごくわずかな質量であっても等価のエネルギーは莫大である。

人為的に核分裂を起こさせる装置が原子炉（reactor, nuclear reactor）、そこから取り出されるエネルギーを電力に変換するのが原子力発電である。

(1) ウランの核分裂

原子炉の燃料として最もよく利用されるのはウランである。ウランには安定同位体が存在しないが、大量に存在するため、比較的半減期の長い核種の天然存在比が報告されている。

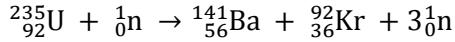
^{234}U : 0.006%、 ^{235}U : 0.711%、 ^{238}U : 99.283%である。

なお、ウランのように安定同位体が存在しない元素を「放射性同位元素」と呼んだこともあったが、元素と原子、同位体、核種の間には異なる概念があり、今は同位元素という言葉は使われない。元素は、酸素、窒素、ウランなど化学物質としての基本要素を示すものであり、元素を構成する原子の中に質量数の異なるものがあり、これを同位体と呼ぶ。ウランには安定同位体（RI）が存在せず、全て放射性同位体（RI）である。

^{235}U は、エネルギーの低い中性子（熱中性子、 $0.02\sim 1\text{eV}$ ）を吸収しやすく、中性子が増えた原子核は不安定となって、核分裂（nuclear fission）を起こす。

原子核反応の場合の「吸収」とは、溶媒の中への化学物質の溶解吸収とは異なり、中性子が核（まと）であるウラン原子核に非弾性的に衝突して起こる反応である。中性子が弾性的に当たれば、弾かれてしまうが、特定のエネルギー範囲にある中性子は、ある確率でウランの原子核に「吸収」される。吸収のしやすさは、核の当たりやすさのようなもので、「吸収断面積」という物性で表され、吸収断面積の大きさは中性子のエネルギーに依存する。

ウランの核分裂では、質量数 95～139 の核分裂生成物 (ff:fission fragment, fission product) と、エネルギーと中性子が放出される。 α 崩壊などと異なり、原子核が二つ以上の大きな核種に分裂する。たとえば次のような反応がある。



1 個の ${}^{235}\text{U}$ に中性子 1 個が吸収され、その後 Ba と Kr に分裂するという反応を簡単に記したものであるが、式の左辺と右辺で陽子の数（原子番号、下付き添え字）と質量数（上付き添え字）の合計がそれぞれ等しくなっている。

ここで、 ${}^{235}\text{U}$ が ${}^{236}\text{U}$ に変わる過程や、陽子数、中性子数に関係のない γ 線などの粒子、エネルギーの放出は省略している。また、中性子は通常は質量数、原子番号（陽子数）を書かないが、数字が合うように示した。

核分裂によってどのような反応生成物ができるかは様々で、確率的であり、反応生成物には、 ${}^{133}\text{Cs}$ 、 ${}^{137}\text{Cs}$ 、 ${}^{135}\text{I}$ 、 ${}^{93}\text{Zr}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ 、 ${}^{133}\text{Xe}$ などがある。これらの生成物は気体あるいは固体のまま、 ${}^{235}\text{U}$ があつた場所、燃料棒の中に閉じ込められている。 ${}^{235}\text{U}$ が 1 個核分裂した時に放出される中性子の数は、平均すると約 2.5 個である。

0.1MeV 以上のエネルギーを持つ中性子を高速中性子 (fast neutron) と呼ぶが、ウランの核分裂で放出される中性子のエネルギーは、平均 2MeV、1 個の中性子を吸収した ${}^{235}\text{U}$ から 2.5 個の高速中性子が飛び出す。

中性子の数は増えるが、高速中性子が ${}^{235}\text{U}$ に吸収される確率（吸収断面積）が小さいため、そのままでは、次の核分裂が続かない。高速中性子は、近くの ${}^{235}\text{U}$ には吸収されず、燃料棒、燃料被覆材を透過していく。

そこで、核分裂の連鎖反応 (chain reaction) を維持するために、高速中性子を減速させて、熱中性子とし、次の核反応に利用するための「減速材」が設けられる。

核分裂によって発生した高速中性子を減速して熱中性子に変え、 ${}^{235}\text{U}$ の核分裂の連鎖反応を自立させてエネルギーを利用する反応装置を「熱中性子(原子)炉」と呼ぶ。

実際には 2.5 個の中性子全てが次の核分裂に使われるのではなく、減速されずに失われる中性子、 ${}^{235}\text{U}$ 以外の物質へ吸収される中性子、制御棒によって吸収される中性子などがあり、中性子の数の均衡がとれた状態、すなわち、連鎖反応が一定の出力で安定した状態になるように原子炉が運転される。

熱中性子炉の内部の、(中性子の平均 1 世代寿命の生成数) / (中性子の平

均1世代寿命の消滅数)を中性子の実効増倍率と呼び、原子炉内の中性子の増減を表す。この実効増倍率の値がちょうど1の時を「臨界」と呼び、原子炉内の中性子数が安定する。原子炉内の機器による中性子の吸収や漏れによって中性子が少なくなり、実効増倍率が1以下になると核分裂の連鎖反応が維持できず原子炉が停止するので、原子炉を運転するには臨界を維持しなければならない。

発電用に利用される非常に多くの原子炉がこの ^{235}U を核燃料とした熱中性子炉であり、減速材にどのような材料を使うかが、原子炉の設計にとって非常に重要な要素となる。軽水炉、重水炉、黒鉛炉などの原子炉の種類を表す言葉は、減速材に用いる物質名から来ている。

(2) 核分裂と核融合

ウランのように質量の大きい原子核は、核分裂反応がエネルギーを放出する発熱反応となるため、「重い原子核」の核分裂反応を利用してエネルギーを取り出すのが「原子力エネルギー」である。一方、水素やヘリウムのような軽い原子核の場合は、核融合反応が発熱反応であり、太陽などの恒星のエネルギー供給源である。核融合は自然界にはありふれた反応であるが、地球上にはなく、人工の核融合反応を制御してエネルギーを取り出すことは技術的に極めて難しいため、核融合エネルギー利用は研究途上であり「核融合炉」はまだ実用化されていない。したがって、現在、原子力エネルギーと言うと全て核分裂のエネルギー利用を指す。

重い原子核と軽い原子核の境は、鉄(^{56}Fe)である。

前後で核融合と核分裂の放出エネルギーの符号が変わるため、核融合による元素合成は最大、鉄までである。

恒星の中では、軽い元素が核融合によって、より安定な重い元素に変わっていく元素合成反応が起こっているが、太陽ほどの質量であれば、水素からヘリウムまで、太陽より十分に大きな質量を持つ恒星であっても、最終的には珪素や鉄までしか元素の合成はできない。したがって、太陽系の物質のほとんどは、水素とヘリウムである。しかし、これより重い元素も微量に存在しており、地球のような岩石惑星では、水素やヘリウムよりも重い、鉄や珪素や酸素のような元素の方が圧倒的に多い。

これは、太陽系の原料(分子雲)が、かつて存在した星が爆発した後の残骸であり、前の星が合成した元素が残っているためである。

太陽よりも質量が大きい恒星では、ヘリウムよりも重い元素、酸素や窒素、

炭素などの元素が核融合によって合成されている。しかし、質量の大きな恒星の寿命は非常に短く、惑星系を構成し生命を誕生させるには十分な時間がない。このような恒星が合成した様々な元素は、恒星の寿命が尽きた後、残骸として宇宙に漂い、重い元素は次に誕生する星に受け継がれていく。

太陽ほどの質量の星であれば 100 億年ほどの寿命があるため、惑星系が構成されて、地球のような岩石惑星が形成される時間を持っている。

天文学では、水素・ヘリウム以外の元素を重元素あるいは金属と呼び、天体の「金属量」（重元素の割合）は、その星の年齢の指標になっている。星の進化の過程から、新しく生まれた星、後からできた星ほど金属量が多くなる。太陽の金属量は 1.6% と非常に多く、宇宙の中ではかなり若い種族の星ということになる。宇宙の年齢 138 億年に対して太陽系と地球の年齢はわずか 46 億年である。

重元素は、恒星内の核融合反応で合成され、宇宙に拡散し、次の星の原料となっている。しかし、前述のように鉄よりも重い元素は吸熱反応であるため、恒星内で自然に合成することはできない。ところが、地球上には、鉄よりも原子番号が大きい様々な元素が存在し、核分裂によってエネルギーを放出するウランのような非常に重い元素まで存在している。このような非常に重い元素も前の世代の恒星の残骸に含まれていた元素が起源であるが、核融合では合成されない重い元素がどのようにしてできたのか、その生成過程は、フレッド・ホイール（1915～2001 年、イングランド）が提唱した超新星元素合成（1954 年）によって説明されている。

恒星の元素合成反応が終了して星の寿命が尽きると、小さな恒星は重力崩壊によって白色矮星となり、大きな恒星は「超新星爆発（supernova）」を起こす。超新星爆発時の巨大なエネルギー放出時に重元素が合成され、さらに鉄よりも重い元素が合成される機構がホイールらによって示された。

超新星爆発は、銀河系の中では 100～200 年に 1 度ほどの頻度で起きている。宇宙の時間でみると比較的多く起こるが、人類の歴史の長さでみると、なかなか目撃・観測されることがない。古い歴史書や古文書に超新星の記述が厚賀、1987 年に地球で観測された超新星爆発（SN1987A）は、383 年ぶりのことであり、近代科学によって初めて観測された超新星となった。日本のカミオカンデによって超新星からの宇宙ニュートリノが捉えられ、超新星爆発のモデルの正しさが実証された。超新星爆発によって生じたニュートリノを観測、ニュートリノ天文学の発展に貢献した小柴昌俊のノーベル物理学賞（2002 年）につながった。

(3) 核エネルギー

基本的には、重い原子核であれば、どのようなものでも核分裂によってエネルギーを放出する。しかし効率的に原子力の核燃料に使える物質は限定されている。

非常に安定な原子核では、中性子の吸収、核分裂の連鎖反応が起こる確率が低く、エネルギーの取り出しは事実上不可能である。逆に非常に不安定な原子核であれば、安全な燃料の製造や安定した核分裂反応の制御が不可能である。したがって、技術的・経済的に核分裂のエネルギーが利用でき、資源的にも十分な量が供給できる「核燃料」の種類はそれほど多くはない。

核燃料に使用できる物質は、ウラン、プルトニウム、トリウムなどの元素の特定の同位体に限られている。

²³⁵U は、ウラン中に 0.7% 含まれる最もポピュラーな核燃料である。

表 6-6-3 に、²³⁵U の核分裂で放出されるエネルギーの内訳を示す。

²³⁵U 原子核 1 個が核分裂する際に放出されるエネルギーは、平均 200MeV (メガ電子ボルト、electron volt) である。

電子ボルト (eV) は、物理学でエネルギーと質量を表わす時に用いられる単位である。もともと核物理、加速器の分野で用いられたが、現在では化学、半導体の分野でも用いられるようになってきている。SI 単位ではないが SI が認める併用単位である。

1eV は、1 個の電子を電圧 1V で加速する時のエネルギーである。したがって、極めて小さく、他のエネルギーの単位とは、桁が大きく異なる。表に示すように SI のエネルギーの単位ジュール J に対して 17 桁も小さい。

メガが 100 万倍なので、大きな値と錯覚しやすいが、200 メガ電子ボルトは、非常に小さなエネルギーである。たとえば、1 本 27g の単三電池には、約 2.4Wh のエネルギーを蓄えられるから、乾電池から取り出せる電気エネルギーを電子

表 6-6-3-²³⁵U 原子核の 1 核分裂あたりのエネルギーの内訳

エネルギーの種類	MeV
核分裂生成物の運動エネルギー	168
即発のガンマ線	7
即発の中性子	5
核分裂生成物からのベータ線	7
核分裂生成物からのガンマ線	6
ニュートリノ	10
合計	200

1eV = 0.160 × 10⁻¹⁸J = 44.5 × 10⁻²⁷kWh

1MeV = 0.160 × 10⁻¹²J = 44.5 × 10⁻²¹kWh

1Wh = 22.5 × 10²¹eV

200MeV (2 億電子ボルト) = 8.9 × 10⁻¹⁸kWh

235 ウラン 1g は、原子 2.56 × 10²¹ 個

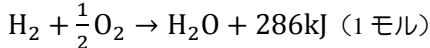
ボルトに換算すると、電池 1 個あたりのエネルギーは、 $54 \times 10^{21} \text{eV}$ ($54 \times 10^{15} \text{MeV}$) となる。この乾電池が持つ電気化学エネルギーは、ウランの核分裂の 200MeV の、 2.7×10^{14} 倍である。

ウランたった 1 個の核分裂と乾電池 1 個を比べるためこのようなことが起こる。eV を使うときは、現実的な個数との違いに注意が必要である。ニュース番組などでしばしば、核エネルギーの大きさの表現に混乱がみられるが、これは、原子核 1 個あたりの値と 1 グラムの燃料あたりの値が混同されているためのものである。

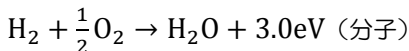
ウラン原子核 1 個あたりでは、 200MeV であるが、ウラン 1g あたりでは、2 万 3000kWh ($82 \times 10^9 \text{J}$) になり、電池 1 個の 2.4Wh とは比較にならないほど大きい。

一般的に化学反応のエネルギーを表す時は、モルあたりのエネルギーや重量あたりのエネルギーで示されるのに対して、原子核や素粒子の反応では、1 個 (1 回) あたりのエネルギーで議論するため、アボガドロ定数 6.02×10^{23} を乗じるほどの大きさの違いが生じる。

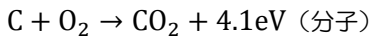
たとえば、水素と酸素の反応は、次式のように書かれる。



何も注釈がなければ、化学反応式はモルで示されるのが普通である。この反応式を 1 分子あたりにして、エネルギーの単位を電子ボルトに変えると次のようになる。



同様に炭素を燃やした時のエネルギーは



となる。

モルあたりでなく、1 分子あたりで表示すると、化学反応の燃焼熱は eV オーダーになるので、ここで初めて、ウランの核分裂の 200MeV が非常に大きいことが分かる。化学反応のエネルギーが eV のオーダーであることを同時に示すと、MeV という数値が大きいということが実感できる。

ウランの核分裂反応は、化学の燃焼反応のおよそ 5 千万倍～1 億倍大きい。

この核分裂反応における莫大な放出エネルギーは、反応前と反応後の質量

の違い（質量欠損）がエネルギーに変換されたことによる。

しかし、アインシュタインの式 $E = mc^2$ で計算すると 1g の質量は、 $9 \times 10^{13} \text{J}$ ($2.5 \times 10^7 \text{kWh}$ 、2500 万 kWh) のエネルギーに相当する。

これは、ウラン 1g の核分裂による $8.2 \times 10^{10} \text{J}$ (2 万 3000kWh) の、約 1000 倍大きい。

したがって、質量がエネルギーに変換されるとは言っても、これはウランが全てエネルギーに変わったのではなく、1g が反応した時のわずか 1mg ほどの質量欠損がこの大きなエネルギーに相当するということである。アインシュタインが示した質量とエネルギーの等価の式を現実の物質に当てはめると非常に大きなエネルギーとなる。

この莫大なエネルギーを使えるエネルギーに変換して取り出すために様々な種類の原子炉が開発された。核分裂のエネルギーを熱エネルギーとして取り出す原子炉と、その熱エネルギーを電力に変換する原子力発電の技術が実用化されたのは 1950 年代である。

多くの形式の原子炉が実用化されており、利用する中性子のエネルギー（高速炉、中速炉、熱中性子炉）、減速材の種類（黒鉛減速、重水、軽水）や反射材（中性子が漏れないように閉じ込める）、燃料の形状（燃料棒、均質炉）、発電炉であれば電力を取り出す熱サイクル、冷却材（ガス、水、液体金属）などが組み合わされる。

（4）原子炉の主な型式

原子核の核分裂反応を行う反応装置を「原子炉」と呼ぶ。

原子炉の用途としては、軍用生産炉、駆動用（艦船など）、材料試験用、医療用、研究用、教育用、発電炉（動力炉）、地域熱供給炉、宇宙炉などがある。

日本には、軍用生産炉、艦船駆動炉、地域熱供給炉などがないため、原子炉と言えば、発電炉（原子力発電）、研究炉、医療用である。

研究用の原子炉は、大学や民間企業が所有するものがあり、現在は、東海村に 7 基（JAEA 日本原子力研究開発機構）、大洗町に 3 基（JAEA）、川崎市に 1 基（東芝）、東大阪市に 1 基（近畿大学）、大阪府熊取町に 2 基（京都大学）の研究炉がある。川崎市（武蔵工大など 3 基）、横須賀市（立教大学）、むつ市、などの研究炉が既に廃止されている。

研究用の原子炉は、①中性子ビームを発生させ、理工学研究、医療研究などを行う②原子炉材料、核融合炉用材料の材料試験を行う③放射性同位体を生産する④教育訓練を行う⑤新材料の研究を行う（電池やプラスチックの開発）などの目的、あるいは多目的で運用される。熊取町の原子炉は、京都大学医学部附属病院が医療用（治療用）にも使用している。

地域熱供給炉は、ロシアでの実績が多く、地域熱供給炉システム、発電炉による電熱併給システム、発電・海水淡水化併用システム、砕氷船搭載用電熱併給炉などがあるが、装荷した燃料を交換することなく長期間熱を供給できることが利点である。特に燃料補給が困難な地域、極地や酷寒の地で利用されている。

宇宙観測機は、長期のミッションにおける動力源（電力）が必要であるが、太陽から遠い場合は太陽光線に頼れないため、放射性物質（プルトニウム等）の崩壊熱を電力に変換する原子力電池が用いられるのが一般的である。さらに大電力が必要な場合は原子炉を搭載することもある。

原子力電池は長期に安定して電力を供給できるため心臓ペースメーカーの動力や月面探査機の動力などに用いられてきた。摘出が容易ではないペースメーカー用の原子力電池は高性能のリチウム電池に置き換えられている。

宇宙機用の原子力電池や宇宙用原子炉は、打ち上げ失敗や大気圏再突入のリスクを考えると、できる限り採用しない方向であり、太陽電池の高性能化によって木星のあたりまでは太陽電池への置き換えが可能になってきている。原子炉搭載機を止むを得ず大気圏内に落下させるときは、放射性物質が拡散しないようにユニットが燃え尽きるように運用されている。

発電用の原子炉は、沖縄電力を除く9電力会社が保有、電力会社以外では、日本原子力発電(株)が保有、電源開発(株)が建設中、全て民間企業が保有・管理している。文部科学省が保有する「もんじゅ」は発電プラントであるが、商業炉ではなく研究炉としての位置付けである。

熱中性子を利用して ^{235}U の核分裂の連鎖反応を行う原子炉を熱中性子炉、高速中性子を利用して ^{239}Pu などの核分裂を利用するものを高速炉（高速中性子炉）と呼ぶ。

ウランなどの核燃料が核分裂を起こすきっかけは、これらの原子核が中性子を吸収することによる。

この時の吸収断面積（吸収確率）は、核燃料の種類と中性子のエネルギー

ーに依存しており、²³⁵U では、高速中性子に対する吸収断面積が小さく、エネルギーの小さな熱中性子に対する吸収断面積が大きい。

核分裂によって生じる中性子は、エネルギーが大きい高速中性子であり、熱中性子炉には、これを「減速」して熱中性子にするための材料「減速材」がある。

原子炉の型式は主に、この減速材の材料と反応エネルギーを取り出す「冷却材」の組合せによって区別されている。

表 6-6-4 に主な発電用原子炉の型式を示す。

表 6-6-4. 主な発電用原子炉の型式

	主な区分	減速材	炉型式	燃料	冷却材	燃料被覆管
熱中性子炉	軽水炉	軽水	沸騰水型軽水炉 BWR	低濃縮酸化ウラン	軽水	ジルカロイ2
			加圧水型軽水炉 PWR	低濃縮酸化ウラン	軽水	ジルカロイ4
	重水炉	重水	重水炉	天然酸化ウラン	重水	ジルカロイ2 / 4
			沸騰軽水冷却		軽水	
	黒鉛炉	黒鉛	コールダーホール	天然金属ウラン	CO ₂	マグノックス
			改良ガス炉	低濃縮酸化ウラン	CO ₂	クロム・ニッケル・ニオブ鋼
高温ガス炉			濃縮酸化ウラン酸化トリウム	ヘリウム	シリコン・カーバイト被覆	
高速中性子炉	高速炉	なし	高速増殖炉 FBR	酸化ウラン、酸化プルトニウム	金属ナトリウム	ステンレス鋼

日本の商業炉の多くが、米国の技術を導入した熱中性子炉・軽水炉である。

軽水炉は、減速材に通常の水（軽水）を使用する。軽水炉の水は冷却材にも使用され、その冷却材の利用方法によって沸騰水型炉(Boiling Water Reactor、BWR)と加圧水型炉(Pressurized Water Reactor、PWR)の二種類に大別される。

BWR は発生する蒸気の圧力が比較的 low (1000psi、70~75 気圧)、PWR

は蒸気の圧力が高い(2000psi、150気圧)。BWRは、原子炉の中の冷却材(軽水、一次冷却水)をそのまま利用して蒸気タービンを駆動して発電を行う。

BWRの発電方式は、ランキンサイクルであり、これは、石炭や石油を燃焼して水を加熱、蒸気発生器で蒸気を発生させて、蒸気タービンを駆動するのと基本的に同じである。

ウィリアム・ランキン(1820～1872年、スコットランド)とルドルフ・クラウジウス(1822～1888年、プロイセン)が19世紀に、蒸気発生器と蒸気機関を用いた熱機関を発明した。この熱機関は、クラウジウスサイクル、クラウジウス・ランキンサイクルとも呼ばれるが、一般には「ランキンサイクル」と呼ばれることが多く、広く発電に用いられている。

熱源によって蒸気を発生させるランキンサイクルによる「火力発電」は、ガスタービンを除く火力発電と原子力発電に用いられ、世界の発電量の大半は、ランキンサイクルによって生み出されている。

ランキンサイクルによる発電の方法は、比較的単純であり、石炭、石油、原子力によって生み出された熱を水に与え、蒸気を発生させて、蒸気タービンで発電機を駆動、使用した蒸気を復水器で水に戻して循環させる。

循環水は気体を圧縮するのではなく、液体をポンプで送るため所要動力は小さいという特長がある。排熱が大きいと、総合的な効率はまだ高くない。日本のように復水器が海水冷却の場合は、大量の温排水が生じ、輸入した石炭や石油の多くが海水を温めるために使われてしまうが、原子力の場合も大量の温排水が出る。

石炭火力発電では、効率を上げるために、多段のタービンによる再熱ランキンサイクル、ボイラーの運転圧力の高圧化、などの改良やハイテク材料技術が使われるが、原子力発電の場合は、有り余るほどの発熱量があること、原子炉の安定的で安全な運転が最優先されることから、熱サイクルは出来る限り単純な構造とされる。

また、熱負荷の変動を与えないように出力制御も出来るだけ行わずに、一定出力で運転される。原子力の場合は、サイクルの効率よりも、安全性と故障せずに動く稼働率の方が重要である。

PWRは、蒸気を発生させてタービンによって動力を取り出すことはBWRと同じであるが、原子炉を冷却して加熱された冷却水でタービンを駆動するのではなく、この冷却水を一次冷却水として熱交換器を介して二次冷却水に熱を渡し、二次冷却水で蒸気を発生させて発電を行うシステムとなっている。

PWR は、沸騰を抑制するために一次冷却系の圧力を高圧（2000psia）としており、機器類は高価になるが、炉心はコンパクトとなり、二次冷却水で発電を行うためタービンまわりが放射性物質に汚染されることがなく、運転やメンテナンス時の放射線被曝を抑えることが出来るという特長を持つ。

日本国内では、東京電力の福島原子力発電所などが BWR を採用しているが、関西電力の美浜、高浜、大飯発電所などが PWR を採用している。

PWR は、BWR に対して多くのメリットがあるが、一次冷却水と二次冷却水の間に熱交換器を用いるためロスがあること、BWR より高価で複雑となり故障が多くなることが課題である。

PWR は、元々は発電用ではなく米国などで原子力潜水艦などの艦船・船舶用に開発されたものである。艦船では、傾斜や加減速があるため、炉心に気液二相流があると制御しにくくなる（気体の水と液体の水では中性子の分布が異なる）ので沸騰を抑えたいこと、BWR では、一次冷却水をそのまま動力として取り出すため狭い艦船の中では放射線の防御が難しいこと、PWR の方が高圧でコンパクトであることなどから、PWR が採用されている。ただし構造は複雑でコストがかかる

原子力艦船の多くが原子力潜水艦であり、米、ロシア、英国、フランス、中国、インドが保有している。原子力機関は、内燃機関が燃焼に必要とする空気（酸素）を必要としないため海面下でも長く稼働でき、水上艦よりもメリットが大きくなるためである。

水上艦は、米国とフランスが原子力推進の航空母艦を保有しているが、民間船舶はロシアが保有する砕氷船だけである。かつては、原子力動力の民間船が、米国（商船サバンナ）、西ドイツ（貨物船オットー・ハーン）、日本（実験船むつ）にあったが、メンテナンス、燃料の管理、港湾設備や乗員の教育訓練など船舶以外の課題も多く、研究用で終わってしまい、現在は使用されていない。

原子炉の冷却材を沸騰させないということでは、PWR 以外に、低融点の液体金属冷却材を用いる原子炉もある。水よりも沸点が高く、低圧でもコンパクトな設計が可能であるため初期の原子力艦船に採用された。ナトリウム冷却炉（米国）やナトリウムと異なり水と反応しない鉛・ビスマス合金冷却炉（ソ連）などがあったが、技術的課題が多く、現在は、ほとんどが PWR になっている。

航空機も艦船と同様の理由で液体金属冷却炉の試験が行われたが、航空機

では、重量的に放射線の遮閉構造が難しく、乗員の被曝が大きいことが分かり、開発は中止され、現在は航空機用の原子炉の研究は行われていない。原子力の利用が始まった当初 1950 年代は、航空機、鉄道、自動車など様々な動力源に原子力が検討されたが、発電炉、艦船の動力、宇宙機以外のものには実用化されなかった。

水上、水中で揺れるという条件もあって艦船の原子炉には PWR が選択されているが、洋上の化学プラントや艦船搭載の深冷空気分離装置にも気液二相流や傾斜の課題がある。

蒸留塔は気液接触装置であり、PWR のように気体の発生を抑制するという訳にはいかないため、深冷空気分離装置の多くが採用するシーブレイ式蒸留塔や規則充填物による蒸留塔をそのまま使用すると、装置の傾斜によって大幅な性能低下が予想される。洋上プラント、船上プラントでは、定置式とは異なった設計が必要である。

(5) 原子炉の技術世代

原子炉を用いた発電は、原子力の平和利用技術として非常に古くから行なわれており、アメリカ合衆国原子力規制委員会（NRC）では、次のように原子炉の世代を規定している。

- ①第1世代炉：本格的な商業利用以前の発電用原子炉。加圧水型（米国製 PWR）、沸騰水型（米国製 BWR）、マグノックス炉（英国製・コールダーホール改良型ガス冷却炉）などがある。日本原電の東海第一発電所は、既に廃炉となっており、日本には第1世代の原子炉がない。
- ②第2世代炉：1990年代末までに設計された初期の商業用炉。放射性廃棄物の保管には数万年が必要とされる。
加圧水型（米国製 PWR）、沸騰水型（米国製 BWR）、CANDU 炉（カナダ製・重水炉）、改良型ガス冷却炉（英国製・黒鉛減速炭酸ガス冷却型炉 AGR）、VVER（ロシア製・加圧水型原子炉、米国 PWR と同じ構造）、RBMK（旧ソ連製、黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉）などが第2世代となる。設計寿命は30年から40年。
- ③第2世代+：コスト面を改良した第2世代炉。基本的には第2世代炉であるため、安全性は第3世代に劣る。
- ④第3世代炉および第3世代炉+（1990年代以降）：第2世代炉に進化的な改良が組み入れられた改良型原子炉。高価だが、高性能で安全性が高いとされる。

高い熱効率、受動的安全システム、メンテナンスとコストの削減のための規格化が行われている。当初設計は 60 年の寿命、完全な分解点検と圧力容器の交換で寿命は 120 年に延長可能とされる。

ABWR(改良型 BWR、米国 GE 製、東京電力刈羽柏崎 6、7 号機など)、APWR(改良型 PWR、三菱重工製、敦賀 3、4 号機計画)、改良型 CANDU 炉、EPR(欧州加圧水型炉)、改良型 VVER などが第 3 世代炉に相当する。

④第 4 世代炉 Gen4 ジェンフォー：現在研究中の原子炉の設計基準である。放射性廃棄物の保管期間は数十年とされる。

超高温ガス炉(VHTR)は 2021 年頃完成の予定。他の炉は 2030 年までの商業利用は困難と予想されている。超臨界圧軽水冷却炉(SCWR)、超臨界圧軽水冷却炉(SCWR)、超臨界圧軽水冷却炉(SCWR)、超臨界圧軽水冷却炉(SCWR)などが候補になっている。

第 3 世代以降、安全性と効率は、格段に向上しており初期のものとは全く異なる技術が用いられているが、TMI 事故(1979 年、レベル 5)、チェルノブイリ事故(1986 年、レベル 7)以降、世界各地で原子炉の更新が困難となったため、技術の更新もできなくなっており、現在稼働中の原子炉は、旧式の第 2 世代機を延長したものが多くなっている。

多くの産業が、様々な事故を教訓にして、新しい安全技術を開発・導入してきたが、原子力発電所の場合、事故が逆に、設備の更新を遅らせ、安全性の向上を遅らせる結果になっている。

2011 年にレベル 7 の過酷事故を起こした東京電力福島第一原子力発電所の主な原子炉も 1~5 号機は、米 GE 社の BWR3~BWR5 型(格納容器の型式マーク I)と呼ばれる BWR であり、1965 年に採用が決定、1971 年に 1 号機が稼働したものである。6 号機もほぼ同型のマーク II であり、全ての原子炉が第 2 世代のものである。事故の直接の原因ではないが、非常に古い技術で設計・製作された原子炉である。

6.6.3 日本の原子力発電

(1) 原子力発電の基本な利用方法

現在、国内の商用炉の全てが軽水炉であり、一部は第3世代となっている。原子力発電プラントは出力が非常に大きいことが特徴で、発電出力で1基あたり50万~150万kW。熱出力はその3倍程度である。

ひとつの発電所に数基のプラント（原子炉）が設置されることが多く、発電所全体では、設備容量が数百万kWに及ぶこともある。

日本最大の電力会社は東京電力(株)であり、その営業管内である関東地方は国内最大の電力消費地である。しかし東京電力(株)、管内には原子力発電所を保有していないため、関東地方唯一の原子力発電所は、茨城県にある日本原子力発電(株)東海第二発電所(110万kW)である。(国内初の100万kW級発電所)

東京電力は、管外の新潟県(刈羽柏崎発電所)と福島県(福島第一、福島第二発電所)に大型の原子力発電所を所有している。現在、福島第一原子力発電所は正式に廃止が決定(2014年1月、発電所は閉鎖)、福島第二と刈羽柏崎の両発電所も運転を停止中である。

軽水炉の基本技術は、石炭火力と同じ蒸気タービン発電(ランキンサイクル)であるが、原子力の場合は、安全のために起動停止や熱負荷変動を避けるように配慮されており、終日連続運転を行う「ベース電源」となっている。日本では、さらに、原子炉に熱ストレスを与えないように、出力調整も行われない。

図6-6-1に日本の電力の需要と供給の1日の変化の

例を示す(東京電力の事故以前の例)。

日本の原子力発電は、常に一定出力で運転されるため、夜間には余剰電力が発生しやすく、これを吸収するため

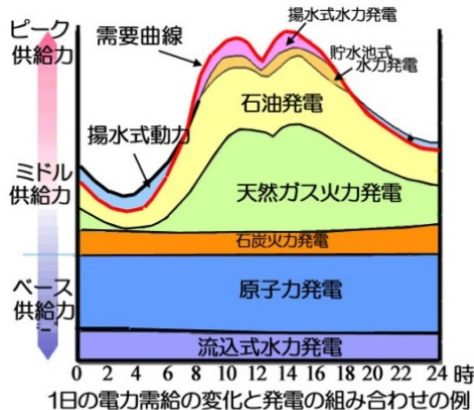


図 6-6-1-日本の1日の電力需給の変化の例

に、大規模な揚水発電所が建設されている。図中、深夜に需要が供給を下回っている時間にベース電源の余剰電力が揚水発電所のポンプ動力に使用されている。

電力各社は、原子力発電の余剰電力を利用するために、「夜間電力割引契約」や「オール電化住宅」などのシステムを普及させ、夜間の需要を拡大する経営を行ってきた。1980年代以降、一般家庭や事務所の電化が大きく進み、電力需要が増大するとともに、多くの原子力発電所が建設されてきた。

昼間の電力の需給調整は、ガス火力発電など、比較的短時間で出力調整が可能な電源によって行われる。

なお、図 6-6-1 の供給側には水力発電以外の再生可能エネルギーによる発電が含まれていない。太陽光発電や風力発電の電力供給量が非常に少なく、また発電量が1日の間の気象条件や気象変化に大きく左右されるため、このようなサイクルには図示することができない。

(2) 原子力エネルギーの備蓄性

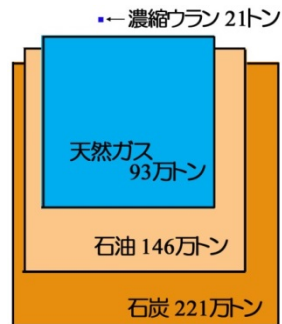
原子力は備蓄が容易なエネルギーである。

現在、国策と法の定めによって備蓄されているエネルギー源は、石油とLPGである。備蓄基地には莫大な建設費とおよそ年間500億円の維持・管理費がかかっているが、発電量に占める石油火力発電の割合は低く、石油の備蓄は、安定期な電源燃料の備蓄とはならない。

現在、発電の主力を占めるのは、天然ガスと石炭であるが、日本には欧米やロシアのような天然ガスの備蓄設備がないため、長期備蓄は不可能である。

輸入LNG基地は、受入れ基地であって、LNGの蒸発を押さるようには設計されていないため長期間の備蓄することはできない。石炭の大量備蓄は、スペースや安全の点から難しい。

図 6-6-2 に各発電燃料の備蓄性を比較する。それぞれ、100万kWの発電所を1年間稼働するのに必要な燃料の「重量」を表わしている。単位が大きく異なり、一次元の棒グラフになりにくいため、正方形の面積で示している。



100万kWの発電所を1年間動かすのに必要な燃料

図 6-6-2-発電燃料の備蓄性の比較

原子力発電用の燃料（核燃料）は、他の燃料に比べると極めてわずかな量が済むため、備蓄基地を必要とせず、原子炉内あるいは発電所内に保管されている燃料が長期間の備蓄の役割を果たす。ほとんどのエネルギー資源を輸入に依存する日本としては、電源用の核燃料は重要な備蓄燃料となる。

しかし、東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、大半の原子力発電所が停止しているため、核燃料の電源燃料としての備蓄機能は失われている。

現在、日本には発電燃料の長期備蓄がないため、もし、もし台風や嵐が続き、天然ガスタンカーや石炭輸送船が日本の港に入れないという事態が長く続けば、通常の電力供給は維持できなくなる。

（3）平常時のクリーン性・で安全性

事故によって安全神話が崩壊し、原子力は、クリーンで安全なエネルギーというイメージが失われたが、原子力発電所では、放射性物質の排出規制とモニタリングが行われ、厳しく管理されており、平時であれば、最もクリーンな発電方式である。

たとえば、石炭は地下資源であり、排ガスや燃焼灰には、ウランやトリウムのような核物質が含まれているため、石炭を大量に使用すればそれに伴う放射性物質放出のリスクはある。しかし、石炭火力発電における放射性物質の除去や排出規制は法の適用外とされ、モニタリングも行われていない。電力業界では、燃焼

表 6-6-5-主な鉱物・製品の放射能濃度 Bq/kg

壊変系列	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
石炭	45	22	180
亜炭・褐炭	150	18	92
原油	87	39	19
花崗岩	53	78	1,100
石灰岩	27	12	300
鉄鉱石	16	6	83
アルミニウム鉱	210	250	38
クロム鉱石	0	1	28
タングステン鉱	2	2	0
リン鉱石	930	140	170
レアアース鉱石	28,000	240,000	14,000
石炭灰	190	74	340
亜炭灰	640	47	300
精油所スラッジ	16,000	6,900	1,900
精油所スケール	34,000	34,000	14,000
精製油	2	5	18
セメント	49	30	210
窒素肥料	250	34	160
リン酸石膏	310	89	70
NiH 電池	22	10	-
Th-W 溶接棒	12	86,000	-
自動車触媒	3,300	210,000	-
船底塗料	12,000	81,000	-
ウラン鉱	3,800,000	120	10

出典は放射線医学研究所の公表値。値は平均値の小数点以下を四捨五入、サンプルによって測定値は一桁くらい異なることがある。

灰の放射線の測定を行わないための特例措置として、燃焼灰を資源として利用する場合の使用割合の上限を自主規制している。これは石炭火力が危険と言うことではなく、どのような鉱物にも放射性物質が含まれており、いくらかのリスクがあるため、燃焼灰による被曝を小さくするための措置が行われているということである。

原子力の場合、事故が起こると広範囲に被害が及ぶことが重大な問題であるが、平時は、公害の原因や酸性雨の原因となる大気汚染物質や水質汚染物質もほとんど出さず、放射性物質の排出も管理されており、クリーンで、CO₂の排出量が非常に少ない「環境にやさしい」エネルギーである。

なお、ほとんどの産業では、日常的に原材料の放射線量や放射能の測定を行っていないが、国立放射線医学研究所では、天然資源、工業製品、廃棄物などの放射能濃度を詳細に公表している（国内での測定値、IAEAの基準値など）。およその値を表 6-6-5 に示す。

（4）準国産エネルギー

日本は、核燃料原料を、自国で管理しているため、日本の原子力発電は、国際的には「国産エネルギー」とみなされる。ウランは地球表面の鉱物の中に普遍的に含まれるが、原子力発電の燃料となるウランの鉱山は日本にはなく、はじめの燃料用ウランをカナダやオーストラリアから輸入している。したがって、国産ではなく、「準国産」のエネルギーと呼ばれることもある。

日本は、核燃料サイクルの確立が遅れ、現在は、再処理を英仏に委託しているため不完全ではあるが、核燃料の自国管理が許されている国である。核保有国（核兵器の保有国）と核燃料生産国以外で核燃料の自国管理が認められているのは日本だけであり例外とされている。

韓国や台湾など原子力発電の規模が大きい国であっても、自国での燃料の処理・管理が認められていない国では、原子力は輸入エネルギーとみなさるが、日本の場合は準国産エネルギーとされている。

（5）原子力発電と立地地域との結びつき

1974年（昭和49年）に電源三法（開発促進税、促進対策特別会計、周辺地域整備）が成立、立地自治体への交付金の仕組みができた。その後、原子炉の減価償却がすすみ、固定資産税収入が減ったため、立地自治体はプラントの新設をのぞむようになり、同じ敷地内、地域に多数のプラントが建設されるようになった。

税金、雇用、各種交付金、公共施設の建設など発電所と地域経済の結びつきは非常に強い。

核燃料税などの（法定外の）独自課税を行う自治体もある。柏崎市、川内市は、さらに使用済み燃料にも課税を行うようになった。

表 6-6-6 は、福島事故以前の日本の電力会社の原子力発電の依存割合である。関西電力、九州電力、北海道電力 3 社

の原子力依存度が大きい。東京電力は非常に大きな原子力発電所を保有するが、全体の規模が大きいため、依存度は比較的小さい。中部電力も大きな工業地帯をかかえ、規模が大きいが、豊富な水力発電と大規模な火力発電を保有するため原子力発電の依存度が小さい。

(6) 日本の原子力発電技術

日本は、原子力発電では後発であるが、商業用発電炉は 50 基あり（福島事故以前）、規模は世界第 3 位である。当初、英国製や米国製の原子力発電所を技術導入していたが、現在は自国での設計製作が可能となっている。

特に米国では TMI 事故（1979 年）以降、新規の発電所建設がなくなり、米国内では、人材確保や原子力技術の維持が困難となったため、逆に日本の技術が支えることになった。

世界の主な原子力産業グループは、日立 GE ニュークリアエナジー（日米）、東芝ウェスティングハウス（日米）、三菱重工（日）、アレバ（仏）、CANDU（カナダ）、シーメンス（独）、ロスアトム（ロ）などである。

表 6-6-6-日本の電力会社別原子力発電所

	設備比率%	発電比率%	発電所
関西電力	29	40	大飯、美浜、高浜
九州電力	27	41	玄海、川内
北海道電力	28	40	泊
四国電力	30	38	伊方
北陸電力	22	33	志賀
東京電力	27	23	柏崎刈羽、福島第二、（東通）
東北電力	20	16	女川、東通
中部電力	11	15	浜岡
中国電力	11	8	島根
日本原電	100	100	敦賀、東海第二
電源開発	0	0	（大間）
沖縄電力	0	0	

数値は、東京電力福島第一原子力発電所の事故（2011 年）以前のもの。○ 内は建設中の発電所

6.6.4 世界の原子力発電

日本国内は、電力需要は今後大きく増えることはないが、発展途上国などでは、電力需要が伸び、電力供給不足が深刻化すると予想されている。

原子力発電の位置付けは各国の事情によって大きく異なっている。

表 6-6-7 に、各国の対応を、おおまかにまとめる。

原子力発電の依存度が高い国としては、フランス、韓国、ウクライナ、スウェーデン、などが知られているが、この表にはないその他の国としては、チェコ 33%、スロバキア 69%、ブルガリア 42%、スロベニア 40%、アルメニア 44%、リトアニア 80%の依存度が高い。

自国内にエネルギー資源がなく、輸入する経済力も十分でない国は原子力に頼らざるを得ないという事情もある。原子力を推進中の国としては、フィンランド (31.6%)、ハンガリー、インド (3.7%)、メキシコ、ブラジル、アルゼンチン、ベトナム、UAE、トルコなどがある。

ポーランドは、石炭火力が、98%を占め深刻な大気汚染があり、対策が急がれる。

米国、ロシアは、原子力大国であるが、資源大国でもあり、電力全体に占める原子力発電の割合が低い。

資源大国として特徴的なのは、カナダとオーストラリアである。広大な領土を持ち、ウランや天然ガス、石炭などの地下資源に恵まれ、人口も少ないため、世界へ資源やエネルギーを輸出する国であるが、カナダは水力発電と原子力発電を推進、ほとんど CO₂ を排出しない国になっている。オーストラリアはウランを全て輸出、国内は石炭火力発電が中心で、人口当たり、GDP 当たりの CO₂ 排出量は最も多い。

現在は、原子力大国であるが、廃止の方向へ舵を切ったのはドイツである。既に何機かの原子炉を停止して準備を進めているが、周辺国との関係、国内の経済、褐炭利用による環境汚染と CO₂ 排出量増大など多くの解決すべき課題がある。

表 6-6-7-世界の主要国の原子力発電

国名	設備容量 万 kW	発電実績 億 kWh	発電比 率%	操業中	建設中	備考
米国	1,0220	7,904	19.2	104	1	TMI 事故以降停滞したが世界最大の規模
フランス	6,313	4,235	77.7	58	1	国内資源が乏しくオイルショックを契機に原子力大国。電気料金が安価。近隣諸国のベース電源の役割を

第6章 産業ガスと資源・エネルギー147

						担っている。
日本	4,440	1,562	18.2	50	3	設備は世界3位。数値は事故前の値
ロシア	2,416	1,620	17.6	33	10	資源大国であるが、原子力開発を推進。
韓国	2,079	1,478	34.6	23	4	国土は狭いがロシアと同規模の発電所。石炭火力も43%あり、非常に安価な電気料金により高い産業競争力を維持。
カナダ	1,417	883	15.3	20	0	資源大国であるが、原子力先進国。発電は水力と原子力が主力で先進国の中で最もCO ₂ 排出が少ない。
ウクライナ	1,317	849	47.2	15	0	最近になってチェルノブイリ発電所を完全閉鎖。原子力の依存度は大きい
ドイツ	1,200	1,023	17.8	9 (17)	0	西欧第2位の原子力大国。17基中8基を緊急廃止し依存度は米国並みとなった。残り9基を段階的に廃止する予定
中国	1,188	826	1.8	15	26	ドイツと同規模だが経済規模が大きく依存度は一桁小さい。計画中・提案中の171基が実現すると世界最大となる
英国	1,004	627	17.8	16	0	産油国であるが、低炭素社会を目指しており、老朽化した原子炉を廃止して最新鋭のものに更新する。
スウェーデン	940	581	39.6	10	0	高い技術を有する。長期的な脱原発計画があるが原子力依存度は高い
スペイン	745	551	1.5	8	0	
ベルギー	594	459	54.0	7	0	原発廃止を法制化した。原燃依存度が高く代替エネルギーのシナリオがない。
スイス	340		35	1	0	発電と地域暖房に使用。2005年以降脱原発に向かっている
台湾	520	416	16.9	6	2	依存度48%（1987年）から脱原発を推進中。
オランダ			4	1	0	資源大国であり原子力に依存する必要がない。オーストラリアは最大のウラン生産国のひとつであるが
ノルウェー			0	0	0	全て輸出
オーストラリア			0	0	0	
オーストリア			0	0	0	原子力禁止法がある。近隣諸国の原発にも強く反対。IAEAの本部がある

原子力発電の依存度が高いその他の国：チェコ33%、スロバキア69%、ブルガリア42%、スロベニア40%、アルメニア44%、リトアニア80%

原子力を推進中の国：ポーランド（石炭火力が98%を占め大気汚染が深刻）、フィンランド（31.6%）、ハンガリー、インド（3.7%）、メキシコ、ブラジル、アルゼンチン、ベトナム、UAE、トルコ

中国は、ドイツと同じ規模の原子力発電があるが、経済規模が大きく、依存度はかなり低い。石炭火力に大きく依存していることもあって、都市部の深刻な大気汚染やCO₂排出量の抑制が課題である。それぞれの国の経済状態やその他の環境は異なり、発電のベストミックスは大きく異なる。

図 6-6-3 は、2006 年の各国の発電電力に占める原子力発電の割合を示したものである。(出典：原子力百科事典 ATOMICA、原子力発電＞海外の原子力発電所＞海外の原子力発電所(概況)＞「海外の原子力発電所の現状

(2006年) (02-06-01-06)」

図3 発電電力量全体に占める原子力の比率(2006年)、データの出所はIAEA)

フランスの原子力発電比率が大きいことは、非常によく知られているが、リトアニア、ベルギー、ウクライナなど欧州各国の原子力発電比率が大きい。スウェーデン、ドイツ、フィンランド、スイスなどの割合も大きい。

アジアでは韓国の原子力発電の割合が大きく、日本はこれに次ぐ(2006年)。米国、英国、ロシアなどの原子力先進国は他のエネルギー資源に恵まれていることもあり、原子力に依存する割合は小さい。

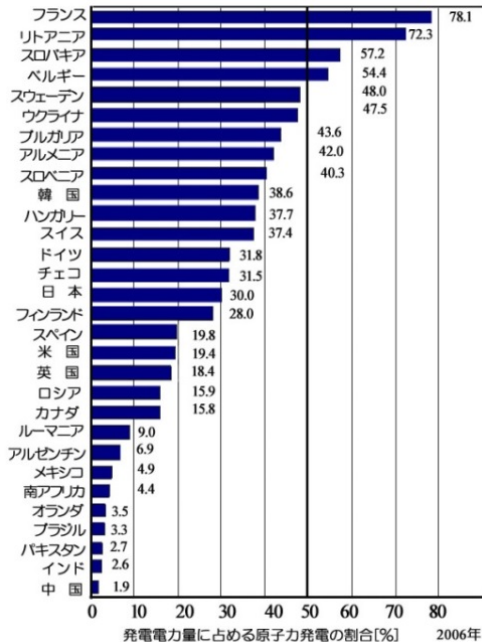


図 6-6-3-各国の発電電力に占める原子力発電の割合

図6-6-4は、各国の原子力発電の容量を示している。出典は同じレポートの「図1世界の原子力発電設備容量」を参考にした。(グラフの縦軸・横軸は変えてある)

設備容量(グロス電力出力、自家使用を含むためネットの送電量よりも少し多い)は、米国、フランス、日本、ロシア、ドイツ、韓国、カナダ、ウクライナ、英国までが1000万kWを越える。小型の原子炉が50万kW程度、最新の大型原子炉では100~130万kW程度の出力があるので、1000万kW以上の国々では10基~20基以上の原子炉を保有している。

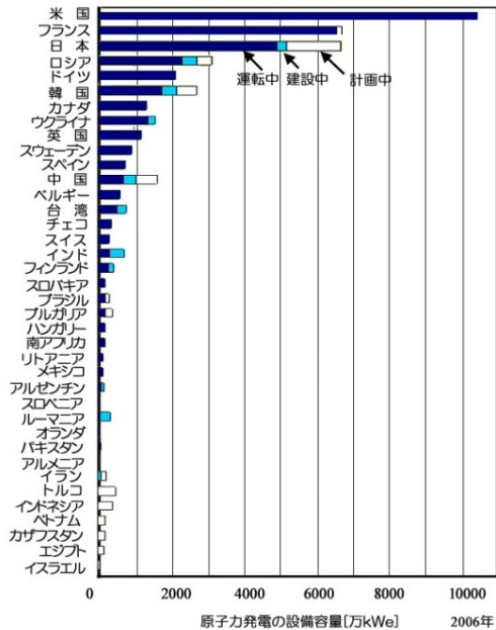


図6-6-4 各国の原子力発電の容量(グロス)

スイス、ベルギー、リトアニアなどは、国の規模が比較的小さいため、原子力発電の割合は大きいですが、原子力発電の容量そのものはあまり大きくはない。

トルコ、ベトナム、インドネシアなどこれから経済発展が予想される国々では、電力不足に備えるため、新たに原子力発電の導入が計画されている。

日本の事故以降、先進国の中では、安全性の観点から脱原子力を目指す国が現われてきている。スウェーデン、ベルギー、ドイツ、スイスなど原子力発電の依存度が高い先進国では、原子力発電の縮小あるいは廃止へ向けての政策的な取り組みが行われているが、莫大な量の代替エネルギーが必要となり、大幅な電力消費削減、石炭火力、ガス火力発電の増強などの対策が検討されている。

発展途上の国では、深刻な大気汚染や、電力不足の解消のために、原子力発電の導入を検討しているところが多い。