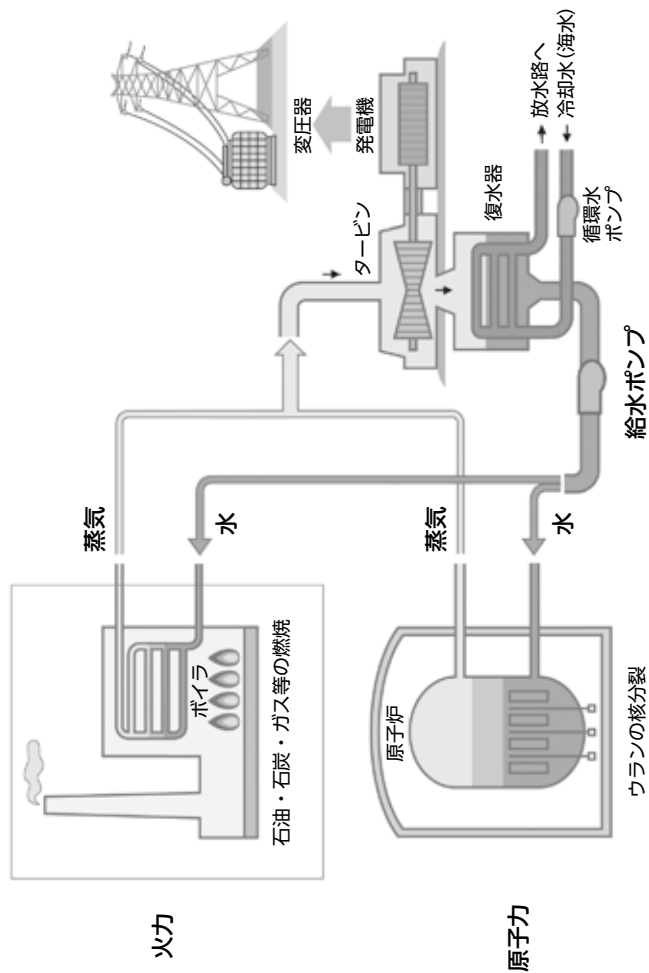


資料① 火力発電と原子力発電の違い



(出所) 日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集2016」

シリーズ  
第3回

原子力発電の現状と課題を読み解く

原子力発電の特徴と課題…安全性

一般財団法人日本エネルギー経済研究所

戦略研究ユニット

原子力グループ

主任研究員

田口

鋼志氏

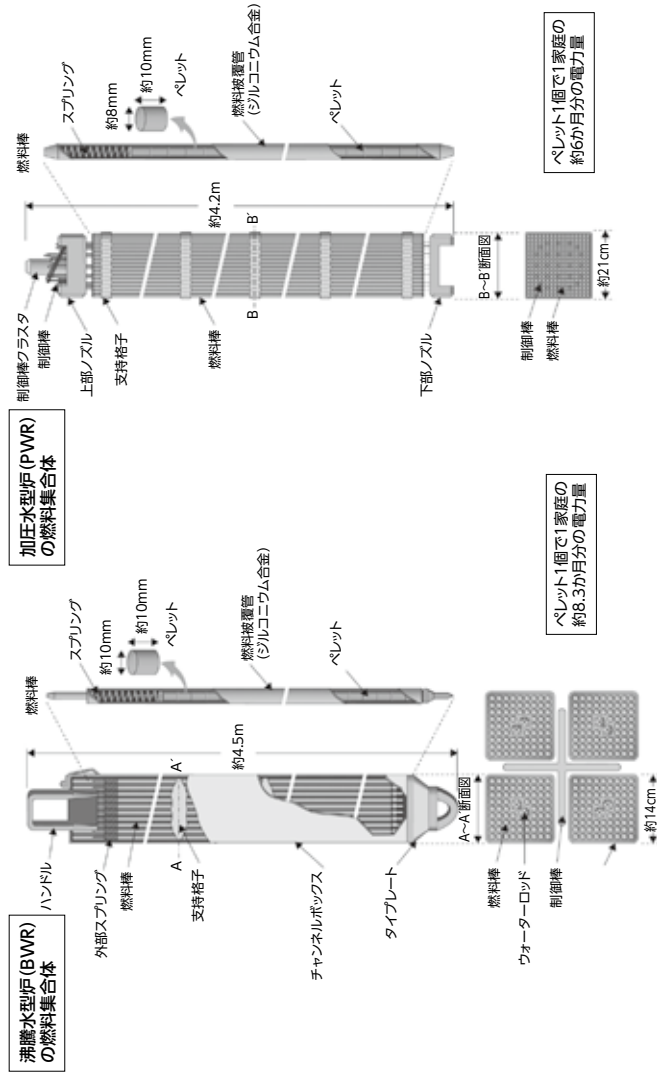
◆はじめに

これまでのシリーズでは、日本や世界における原子力利用状況や原子力の重要性について述べてきました。第3回では、原子力発電の仕組みを簡単に紹介しながら、原子力を利  
用していく上での大前提となる安全性について見ていきます。

◆原子力発電の仕組みと特徴

原子力発電の発電方法は火力発電と大きな違いはなく、資料①(44ページ)に示すよう  
に、火力発電のボイラに相当する部分が原子力発電における原子炉となります。原子炉で

資料② 燃料集合体の構造



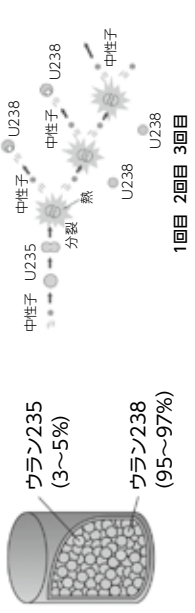
(出所) 日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集2016」

核分裂により発生した熱を蒸気で取り出し、その蒸気でタービンを回転させ、タービンの回転により発電機で電気を発生させるというのが原子力発電の仕組みです。すなわち、蒸気を発生させてから発電する工程は火力発電と同様であり、原子力発電所は、火力発電のボイラの部分を原子炉に置き換え、これに放射線や放射性物質を閉じ込めるための施設を付け加えたものと考えられます。日本では、原子炉でタービンを回す蒸気を直接発生させる沸騰水型炉（BWR）と、蒸気発生器を介して蒸気を発生させる加圧水型炉（PWR）の2種類が採用されています。

原子炉の燃料には、天然のウランから核分裂しやすいウラン235の割合を高め、これをセラミック状に焼き固めたペレットが使用されます。このペレットを、燃料被覆管と呼ばれる筒に密封した「燃料棒」、さらにその燃料棒を数十本〜数百本に束ねたのが「燃料集合体」です。燃料集合体の大きさ等は、原子炉の炉型や出力により異なりますが、日本で採用されている例を資料②（46ページ）に示します。

原子炉を循環する水（または蒸気）には、燃料で発生する熱をタービンに伝える役目と、核分裂で発生する中性子を次の核分裂が起きやすいように減速する役目があります。原子炉では、ウラン235が核分裂することにより発生する複数の中性子が、別のウラン23

資料③ 原子力発電と原子爆弾の違い

原子力発電の場合	ウラン235とウラン238の割合と核分裂連鎖反応	核分裂数の制御方法
原子爆弾の場合	<p>ウラン235の割合が低く、中性子がウラン238に吸収される等の理由により核分裂が一定の頻度で継続する</p>  <p>ウラン235 (3~5%) ウラン238 (95~97%)</p> <p>ウラン235 (ほぼ100%)</p> <p>火薬</p> <p>ウラン235の割合がほぼ100%と高いため、中性子が他の物質に吸収されず、核分裂が次々に起こり、一瞬のうちに爆発的なエネルギーが放出される</p> <p>1回目 2回目 3回目</p> <p>1回目 2回目 3回目</p>	<p>制御棒が多数設置されており、また自己制御制があるため急激に核分裂数が増加することはない</p> <p>制御棒が設置されておらず、自己制御制がないため、急激に増加する核分裂を止めることはできない</p>

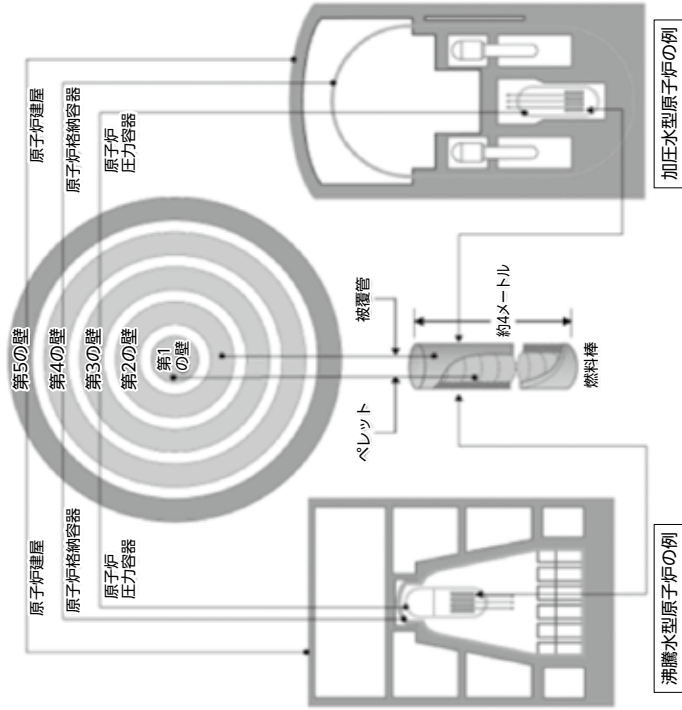
(出所) 日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集2016」

5に当たって次の核分裂を起こしたり、ウラン238により吸収されたりするなど、中性子の発生量と吸収量をバランスさせることで出力の制御が行われています。

資料③(48ページ)に示すように、原子力発電に使用する燃料ではウラン235の割合が3%~5%と低く、一方、原子爆弾ではウラン235の割合を100%近くまで高めたものを使用します。さらに、原子爆弾には核分裂を制御するための機能や性質がありませんが、原子力発電では複数の制御機能を備えるとともに、燃料や原子炉内の水の温度が上昇した場合に核分裂が減少して出力が下がるという原子炉固有の安全性もあります。原子炉の出力制御には、BWRでは炉心を循環する水の流量と制御棒を用い、PWRでは中性子を吸収する働きのあるホウ素を添加した水と制御棒を用いています。

このように、原子力発電は大まかな仕組みとして火力発電と同様ですが、その一方で原子炉での核分裂を制御するための機能を有しており、放射性物質や崩壊熱といった原子力特有の問題も抱えています。それでは、次にこれらの問題への対策を具体的にみていきたいと思います。

資料④ 放射性物質を閉じ込める5重の壁



(出所) 電気事業連合会ホームページ

◆5重の壁と深層防護

原子炉の運転に伴い、燃料中には放射線が発生させる能力（放射能）を持った放射性物質が蓄積されます。原子力発電所では、これらの放射性物質が外部に放出されて一般市民の健康に影響を及ぼすことのないよう、さまざまな対策が講じられています。

原子力発電所の安全を確保するために、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」という基本的な考え方がとられてきました。まず、核分裂反応を「止める」ためには、前項で述べた制御棒やホウ素が用いられます。これらにより核分裂反応による発熱は停止します。しかし、放射性物質は崩壊熱と呼ばれる熱を発生し続けるため、核分裂反応が止まった後も引き続き燃料を「冷やす」必要があります。「冷やす」ための手段として、非常用のポンプ、電源、水源等が備えられています。そして、放射性物質を外部に放出しないよう「閉じ込める」ために、資料④（50ページ）に示す5重の壁によりペレット内で生成する放射性物質を覆っています。

この基本的な考え方のもと、原子力発電所では「第1段階 異常の発生を防止する」「第2段階 異常が発生したとしても異常の拡大を防止し、事故に至るのを防ぐ」、「第3段階

事故に至ったとしてもその影響を少なくする」という具体的な安全対策を施してきました。安全上十分な余裕をもたせた設計や厳重な品質管理、そして入念な点検と検査により異常の発生を防止し、異常が発生した場合には自動監視・早期検知・緊急停止等によりその拡大を防ぎ、万が一の設計上想定される事故の際にも燃料を冷やして放射性物質を閉じ込めるといふものです。このように何段階にも安全対策がなされていることを「深層防護」といいます。

しかし、シビアアクシデント（過酷事故）と呼ばれるような設計上想定される事故を超えるような事故までは安全規制の枠組みには取り入れられず、事業者の自主的な取り組みに委ねられてきました。各事業者もシビアアクシデントの状況を想定してさまざまな対策を講じてきましたが、福島第一原子力発電所の事故を踏まえると、その取り組みは不十分であったと言わざるを得ないでしょう。

#### ◆福島第一原子力発電所事故と新規制基準

2011年3月11日、東北・関東の太平洋岸地域を襲ったM9.0の大地震は、東日本の広大な地域に甚大な被害をもたらしました。

当時、福島第一原子力発電所では6基の原子炉のうち、1号機～3号機が運転中、4号機～6号機が定期検査中でした。地震発生時に運転中の3基は全て自動停止し、発電所外からの受電は地震によって喪失していたものの、所内の非常用発電機による電源供給に自動的に切り替わり、燃料を冷やすための機器が設計どおりに作動して、順調に冷却が行われていたと考えられています。

しかし、地震発生から約1時間後に到達した津波によって、6号機を除く全号機で非常用発電機が停止し、全ての電源が喪失しました。また、配電盤が浸水したこともあって早期の電源および冷却機能の回復に失敗した結果、1号機～3号機の炉心が損傷し、水素爆発や放射性物質の大気中への放出に至りました。さらに、建屋内に大量の汚染水が滞留し、一部は外部に放出されるなど、国際原子力事象評価尺度（INES）で最も深刻度が高い「レベル7（暫定値）」という、チェルノブイリ事故以来の重大事故となったのです。

福島第一原子力発電所事故に対する国内での事故調査・分析として、2012年8月までに、政府、国会、東京電力および民間（福島原発事故独立検証委員会）による四つの事故調査報告書が公開されています。直接の事故原因については、国会による報告書が地震の可能性を否定できないとしているものの、それ以外の報告書では、津波に伴う「全交流

新たな要求事項として追加されました。

地震については、活断層の認定基準や重要な施設を設置する地盤に対する要求が明確化され、設計上想定する揺れの強さ（基準地震動）の策定方法についても、より厳格化・精密化されました。一方、津波については、新たな知見等に基づいて設計上想定する津波高さ（基準津波）を見直し、敷地が浸水しないように防潮堤等により防護した上で、想定を超える津波が襲った場合でも重要な設備が機能を失わないように建屋や部屋を水密扉等で守ることが要求されています。その他の自然現象では、火山や竜巻、森林火災に対する考慮が特に要求され、事業者は防護設備の新設や日常的な運用管理手順の制定等により対応

電源喪失」であると結論づけています。また、津波に対する想定が不十分であり、十分な備えを持たないまま震災の日を迎えた背景には、東京電力の対策不足があったことだけでなく、規制活動が不十分であったことが挙げられています。具体的には、東京電力にシビアアクシデント対策、複合災害という視点が欠けていた（民間、政府）だけでなく、規制側にもそれらの視点が欠けていたこと（民間、政府）、規制当局の専門性が電力会社に劣っていたこと（国会）などが述べられています。

これらの報告書による指摘なども踏まえ、本シリーズの第1回で紹介したように、2012年9月に原子力規制委員会が発足し、2013年7月には「新規規制基準」が施行されました。この新規規制基準は、福島第一原子力発電所事故の教訓のみではなく、海外知見も参考にしつつ、地震および津波の分野も含めて、各専門分野の中立性を確認された学識経験者の有する、最新の専門技術的知見に基づく公開の議論や意見公募手続き等を経て策定されました。

従来の規制基準と新規規制基準の比較を資料⑤（54ページ）に示します。新規規制基準では、「深層防護」の考え方を強化し、従来の規制基準でも要求されていた地震や津波、その他自然事象に対する考慮等が強化されるとともに、シビアアクシデント対策やテロ対策等が

資料⑤ 従来の規制基準と新規規制基準の比較

〈従来の規制基準〉	〈新規規制基準〉	
	意図的な航空機衝突への対応	新設
	放射性物質の拡散抑制対策	
	格納容器破損防止対策	新設
	炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)	
シビアアクシデントを防止するための基準(いわゆる設計基準) (単一の機器に故障を想定しても炉心損傷に至らないことを確認)	内部溢水に対する考慮(新設)	強化又は新設
	自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)	
自然現象に対する考慮	火災に対する考慮	強化
火災に対する考慮	電源の信頼性	
電源の信頼性	その他の設備の性能	
その他の設備の性能	耐震・耐津波性能	
耐震・耐津波性能		

(出所) 原子力規制委員会ホームページ

しています。

また、自然事象以外にも共通的な要因で複数の機器が使用できなくなる事象として、福島第一原子力発電所事故の直接的な原因となった電源喪失の他、火災や溢水が挙げられました。電源喪失に対しては、発電所外からの受電を複数系統確保するとともに、非常用電源の追設、可搬型の電源の確保、直流電源の増強や7日分の燃料の確保も求められています。

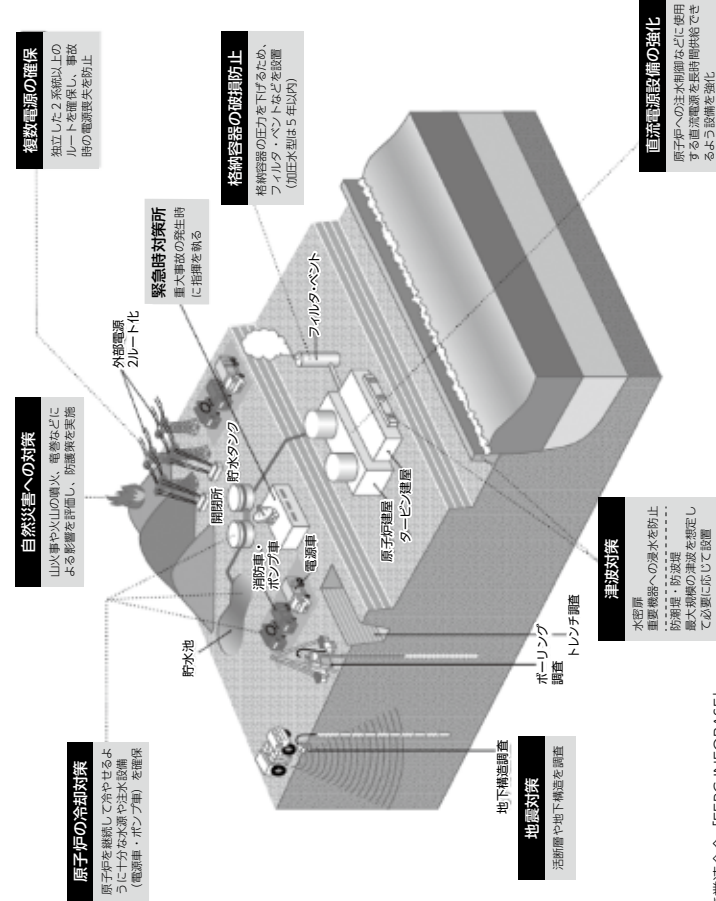
さらに、新たに規制に取り入れられたシビアアクシデント対策では、従来の設計の想定を超える事故まで想定し、複数の機器が故障した場合でも炉心の損傷を防止する対策、炉心が損傷した場合でも格納容器の破損を防止する対策、そして格納容器が破損した場合でも放射性物質の拡散を抑制する対策が要求されました。福島第一原子力発電所事故で注目された使用済燃料ピットについても、事故時に保管燃料を冷却したり、著しい損傷の進行を緩和したりするための新たな対策が求められています。これらの要求に対し、事業者は常設や可搬型の注水設備、減圧設備および放水設備を設置、配備することで対応してきました。また、シビアアクシデント状況下でも使用できる計測機器や監視装置、通信連絡設備、緊急時対策所等の導入も進められています。

意図的な航空機衝突のようなテロ行為に対しては、可搬型設備を中心とし、その接続口も含めて分散して配置する等の対策が求められています。また、バックアップ対策として、「特定重大事故等対処施設」と呼ばれる施設の常設を5年の猶予を設けて要求しています。このように、新規制基準として要求事項が強化、新設されたことにより、日本の原子力発電所は、個々の比較はさておき、全体として世界最高水準の安全レベルを要求されることとなった、と言えるでしょう。事業者はこれらの要求を踏まえ、資料⑥（57ページ）に示すような大規模な安全対策を施し、原子力規制委員会による長期にわたる審査に対応すること、2016年9月末現在で計5基の再稼働（原子炉起動、うち高浜3、4号機は大津地裁の仮処分決定によって停止中）を果たしています。

### ◆安全性向上に向けた取り組みに終わりはない

新規制基準が世界最高水準の安全レベルを要求しているということは、その適合性審査に合格し、再稼働した発電所は世界最高水準の安全性を有しているとも言えます。しかし、どれだけ安全対策を施したとしても、100%の安全というものはありません。また、現状で十分安全だと考えてしまうと、安全性向上への意識が薄れ、個人や組織の安全に対する姿勢も劣化してしまうという指摘もあります。そのため常に、安全上の弱点がないか、

資料⑥ 事業者の安全対策例



（出所）電気事業者連合会（FEPC INFOBASE）

安全性を向上させる余地がないかと考え、効果的な対策を施していくことが重要です。

そのような活動を補助するためのツールとして、想定されるあらゆる事象の発生頻度と発生時の影響の定量的な解析からリスクを算出して安全性を評価する「確率的リスク評価（PRA）」を活用した規制の導入や、事業者の安全性向上への取り組み状況に応じた検査制度への見直しの検討が進められています。また、事業者が発電所の運用ルールとして自ら定めた、事故に備えての日々の訓練に加え、万一事故が発生した場合に複数の事業者が資機材や要員を融通し合う協定を締結したり、原子力緊急事態支援組織を共同で整備したりするなど、事業者の自主的な取り組みも行われています。

原子力規制委員会や事業者のみならず、原子力に関係する全ての者が「安全性向上に向けた取り組みに終わりはない」との意識を持ち、常に安全のトップランナーを目指して最低限の規制要求や各社横並びの安全性を超えて切磋琢磨することで、失墜した原子力に対する信頼が、また自ずと得られるようになるのではないのでしょうか。

◆おわりに

今回は、福島第一原子力発電所事故後の新規制基準と安全対策を中心に、安全性の面か



## 講師略歴

### ●田口 鋼志

(たぐち こうし)

一般財団法人日本エネルギー経済研究所  
戦略研究ユニット 原子力グループ 主任研究員



2005年3月 名古屋大学大学院 工学研究科  
原子核工学専攻修了  
関西電力株式会社を経て、2015年12月に日本エネルギー経済  
研究所入所（出向）

国内外の原子力事業や原子力規制の動向を中心に研究。

ら原子力発電の特徴と課題について確認しました。原子力に関しては、科学的・技術的に安全だと説明するだけでは、特に福島第一原子力発電所事故を経験した今日において、社会に安心を与えるのは困難です。次回は、高レベル放射性廃棄物の地層処分を例に、原子力の社会的受容性について考えたいと思います。

以上