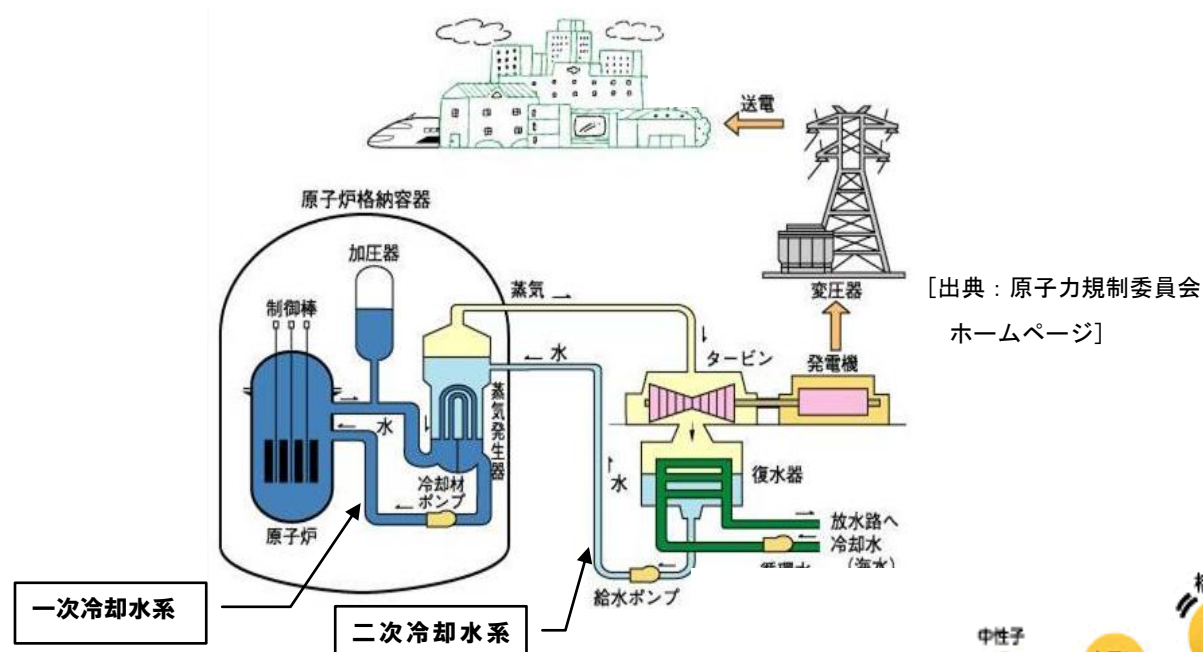
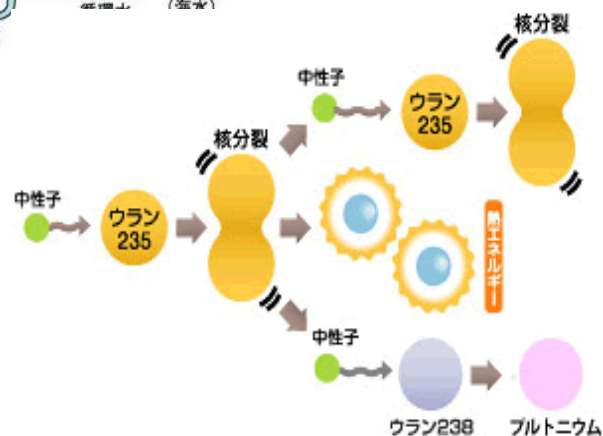


## 「原子炉を止める対策」に関する回答要旨

○伊方発電所は、加圧水型と呼ばれるタイプの原子力発電所であり、燃料であるウランなどが核分裂する際に発生する熱を利用して、高温、高压になった水（一次冷却水）を蒸気発生器と呼ばれる装置に送り、別の系統を流れる水（二次冷却水）を蒸気に変えて、蒸気タービンを回して発電します。



運転中の原子炉の中では、燃料であるウランの原子核に中性子が吸収されて原子核が分裂し、熱エネルギーが放出されるとともに、新たに中性子が放出され、この中性子が他のウランに吸収されることで、さらに核分裂が起こっています。



[出典：四国電力ホームページ]

○原子力発電所の原子炉では、核分裂反応が安定して行われるよう、制御棒などを使って原子炉内の中性子の量をコントロールしています。制御棒とは原子炉の出力を調整する、いわばブレーキの役割を果たすもので、中性子をよく吸収する金属でできています。

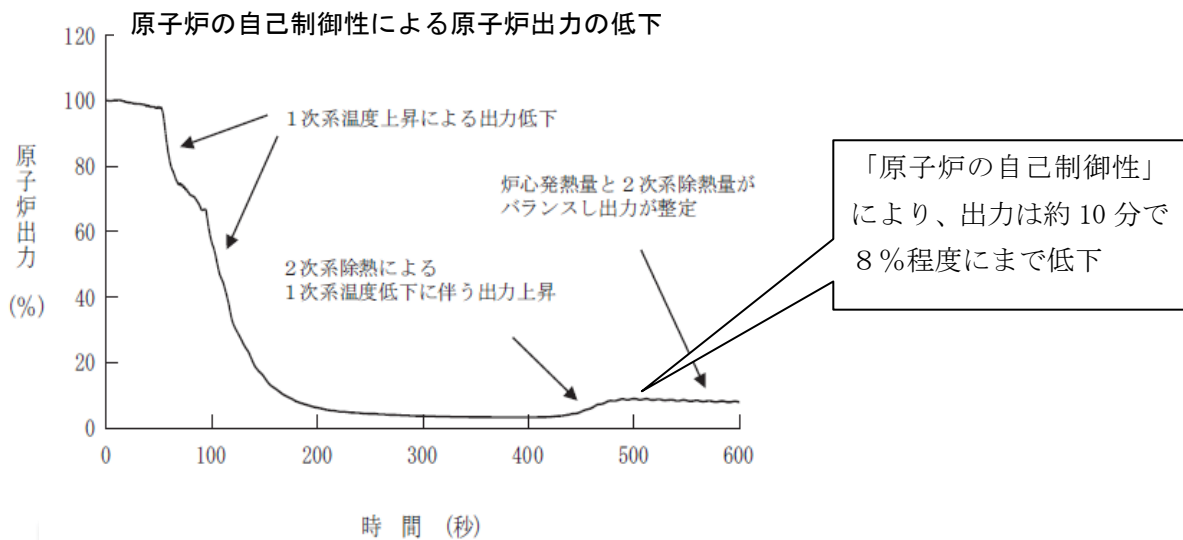
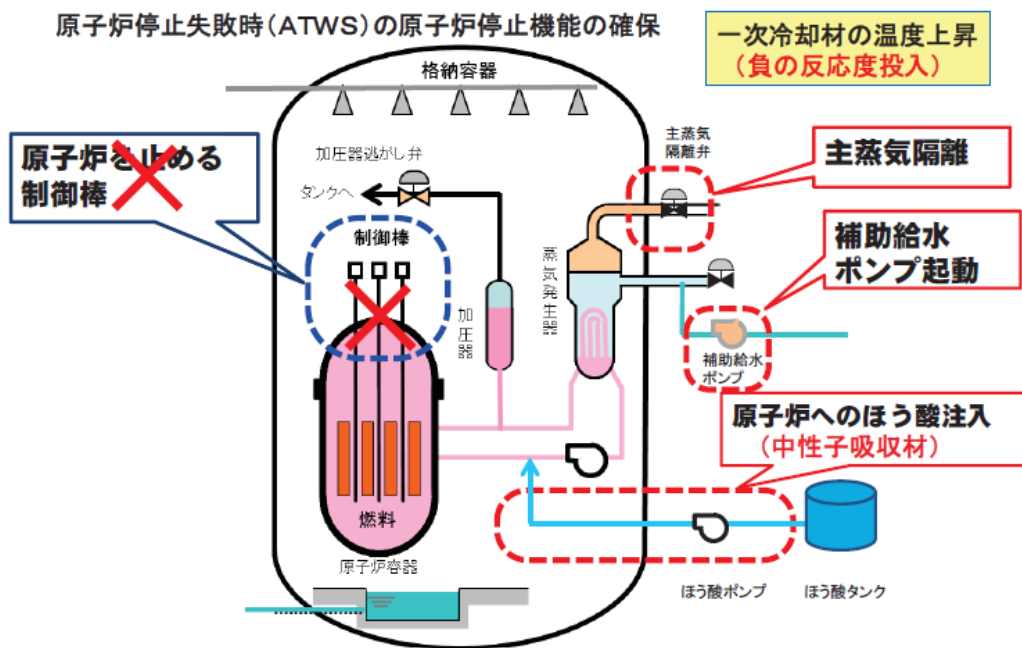
通常、原子炉を停止する際には、制御棒を原子炉の中に挿入し、核分裂を引き起こす中性子を吸収して減らすことで、核分裂を停止させます。

制御棒は、非常にしなやかな細長構造物であるため、地震の影響により制御棒案内管が変形してもその形に追従して挿入される仕組みとなっています。（詳細は問③【原子炉の運転と制御棒】）

○原子力発電所では、震度5程度の大きな揺れを検知するなど、異常を感知したときには、全ての制御棒が自重で落下し、原子炉の中に挿入されるように設計されています。原子炉の中に制御棒が挿入されると、核反応が止まり、原子炉は停止します。（詳細は問③【原子炉を緊急停止させる仕組み】）

万一、制御棒が挿入されなかった場合でも、中央制御室からの手動操作により主蒸気隔離弁を閉め、蒸気発生器から蒸気が逃げないようにすることで二次冷却水の温度を上昇させ、除熱ができなくなった一次冷却水の温度を上昇させます。一次冷却水の温度が上昇すると、「原子炉の自己制御性」※によって核分裂は減少する方向に向かい、原子炉の出力は約 10 分で 8 %程度まで下がります。さらに、一次冷却水に中性子を吸収するほう酸水を注入し、原子炉を停止状態にできるようになっています。（詳細は問③-2【制御棒が挿入されなかった場合の原子炉の停止】）

※「原子炉の自己制御性」とは、一次冷却水の温度が上昇するとウランの核分裂に必要な遅い中性子が減ることとなり、核分裂反応が減少する性質をいう（温度が低下した時は逆の反応となる）。



[出典：愛媛県伊方原子力発電所環境安全管理委員会原子力安全専門部会 (H27. 7. 22) 原子力規制庁提出資料]

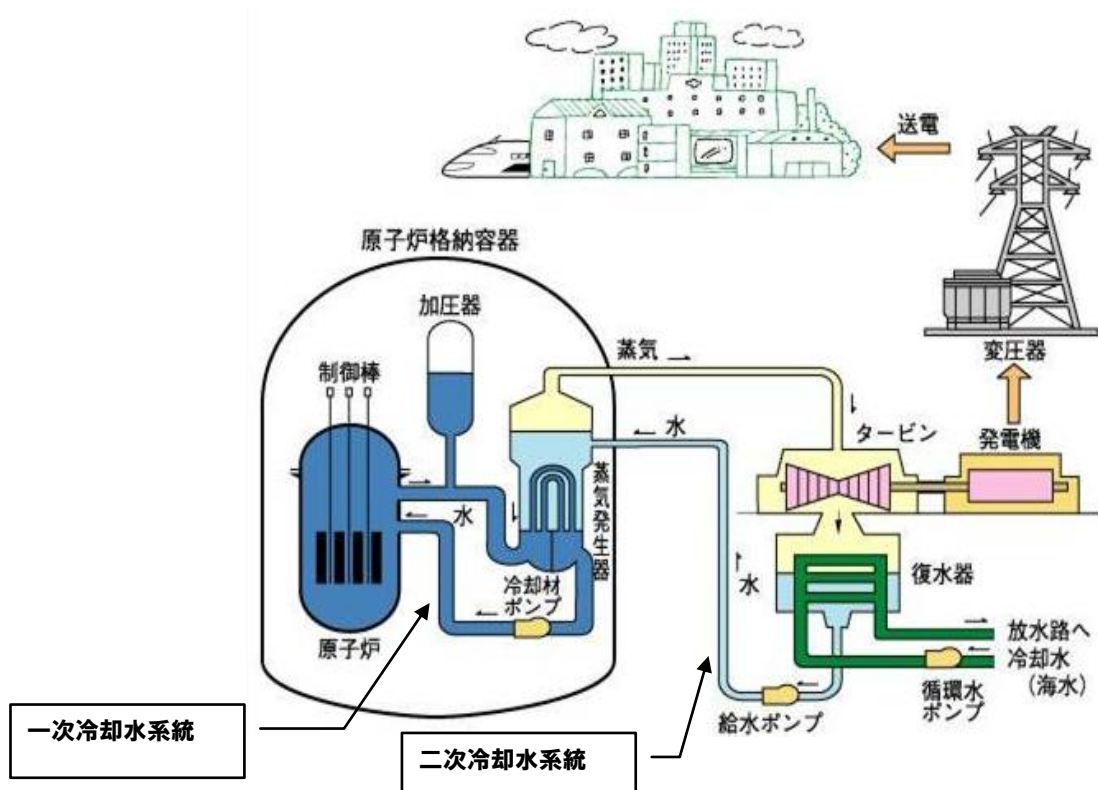
問③ いざというときに、安全に運転を止めることができるのですか。

【原子力発電の仕組み】（図③-1）

加圧水型の原子力発電所では、ウランなどの核燃料物質が核分裂する際に発生する熱を利用しており、高温、高圧になった「一次冷却水」を蒸気発生器と呼ばれる装置に送り、そこで別の系統を流れる「二次冷却水」を蒸気に変えて、蒸気タービンを回して発電します。

運転中の原子炉の中では、燃料であるウランの原子核に中性子が吸収されて原子核が分裂し、熱エネルギーが放出されるとともに、新たに中性子が放出され、この中性子が他のウランに吸収されることで、さらに核分裂が起こっています。このように、核分裂が連鎖的に継続している状態を臨界状態といいます。

図③-1 加圧水型原子力発電所（PWR）の仕組み



[出典：原子力規制委員会ホームページ]

### <参考>核分裂反応（図③-2）

燃料に含まれているウランには、「核分裂しやすいウラン 235」と「核分裂しにくいウラン 238」が含まれています。

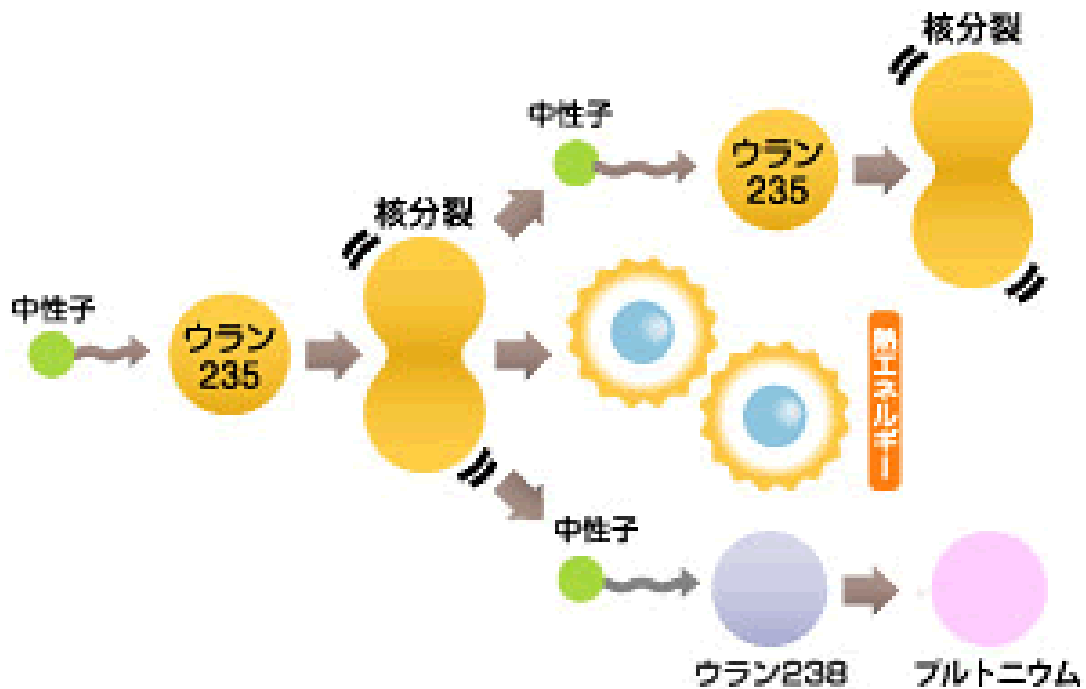
ウラン 235 は低速の中性を吸収しやすく、ウラン 238 は高速の中性を吸収しやすい性質があります。

ウラン 235 が低速の中性を吸収すると核分裂反応を起こし、高速の中性を放出します。高速の中性はそのままではウラン 235 に吸収されづらいですが、原子炉は水で満たされているため、高速の中性は水分子と衝突し、低速の中性（熱中性子）となります。

低速となった中性子は別のウラン 235 に吸収され、新たな核分裂反応を起こし、中性子を放出します。このように、核分裂反応が連鎖的に起こることを核分裂連鎖反応といいます。

水は、燃料を冷却する役割だけでなく、中性子を減速させる役割があり、減速材と呼ばれます。

図③-2 核分裂反応の仕組み



[出典：四国電力ホームページ]

### 【原子炉の運転と制御棒】（図③-3）

原子力発電所の原子炉では、制御棒などを使って原子炉内の中性子の量をコントロールすることにより、この核分裂反応がゆっくりと連続して行われるよう、制御しています。

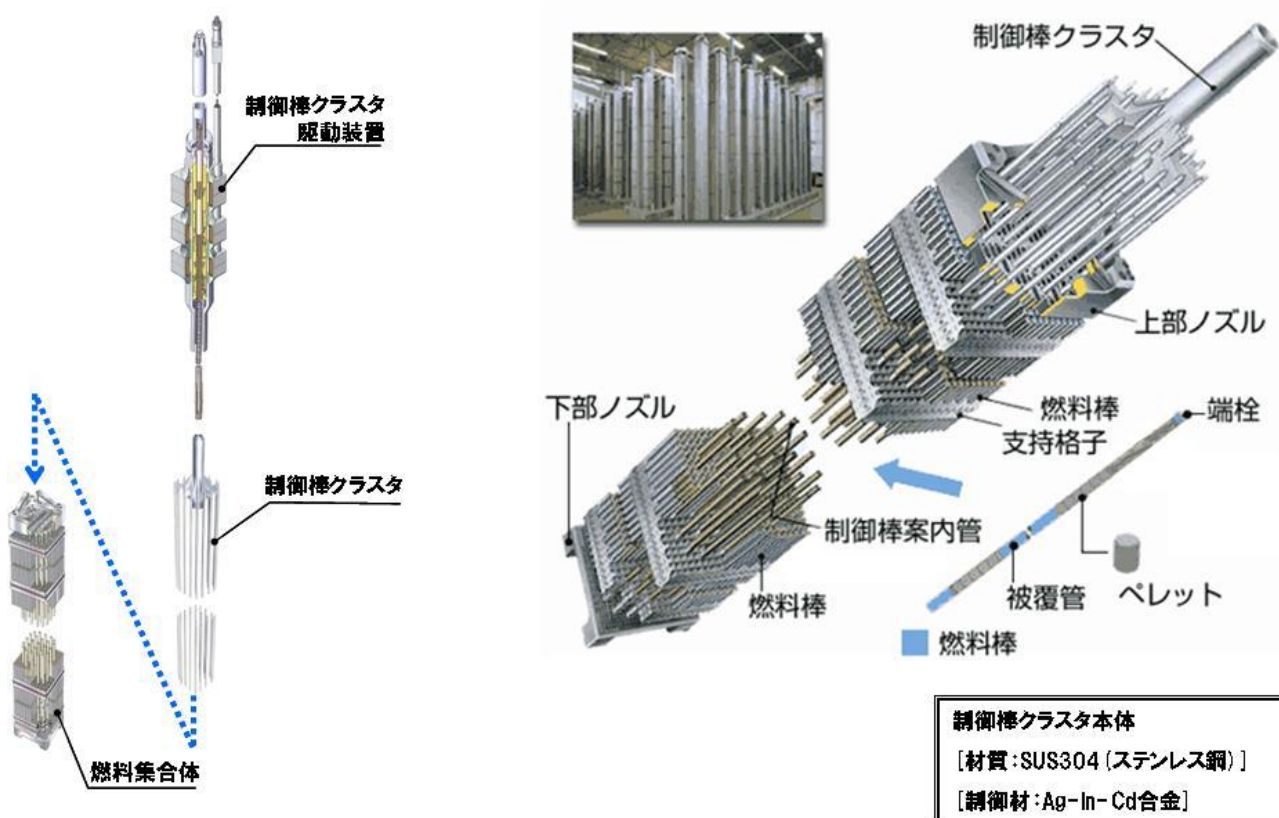
制御棒は、原子炉の出力を調整する、いわばブレーキの役割を果たすもので、銀-インジウム-カドミウムという、中性子をよく吸収する金属の合金できており、複数本をたこ足状に束ねた制御棒クラスタと呼ばれる一体構造で利用されています。各制御棒は燃料集合体に設けられた制御棒案内管と呼ばれる管に挿入される構造となっており、通常運転時は、制御棒案内管に制御棒の先端部が挿入された状態となっています。

通常、原子炉を停止する際には制御棒を燃料集合体の中に挿入し、核分裂を引き起こす中性子を吸収して減らすことで、核分裂を停止させます。

逆に、原子炉を起動する際は、制御棒を徐々に引き抜いて原子炉内の中性子を増やし、核分裂を活性化して原子炉の出力を上げていきます。

また、一次冷却水には中性子を吸収する性質を持つほう酸を溶かしており、その濃度を制御することで出力を調節することができます。

図③-3 燃料集合体と制御棒 (PWR)



[資源エネルギー庁ホームページイラストに部材名を付加]



### 【原子炉を緊急停止させる仕組み】(図③-4)

原子力発電所では、震度5程度の大きな揺れを検知したり※<sup>1</sup>、原子炉内の温度や圧力が制限を超えたときなど、異常を検知したときには、自動的に原子炉を止める信号を出します。そうすると、原子炉の上部で制御棒の駆動軸をグリップしている電磁石の電源が切れ、全ての制御棒が自重で落下し、燃料の中に挿入されるように設計されています。燃料の中に制御棒が挿入されると、核反応が止まり、原子炉は停止します。

制御棒は原子炉を安全に停止するための重要な設備であることから、国の耐震信頼性実証試験において実機を模擬した加振試験が行われており、地震時においても確実に炉心へ挿入できることが確認されています。※<sup>2</sup>

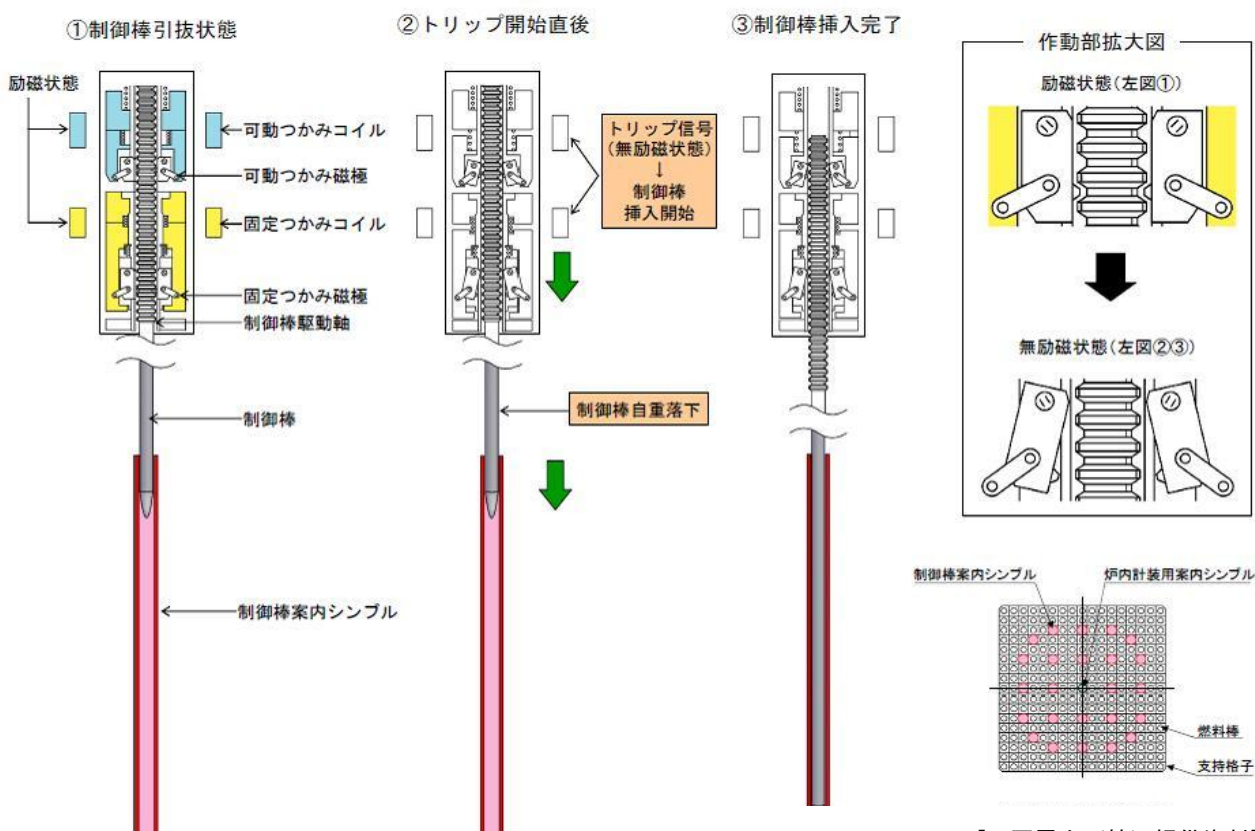
緊急に原子炉を停止する必要がある場合には、運転員が中央制御室のスイッチを手動で操作し、制御棒を一度に挿入して原子炉を停止することも出来ます。

また、一次冷却水の中に中性子を吸収する「ほう酸水」を注入することでも、原子炉を停止することができます。

※<sup>1</sup>伊方発電所3号機では、190ガル以上の地震を検知すると原子炉停止信号を発信します。

※<sup>2</sup>「平成17年度 原子力施設等の耐震技術評価に関する試験および調査 機器耐力その2 (PWR制御棒挿入性)に係る報告書」において、大規模加振条件下で制御棒挿入試験が実施されており、約1560ガルにおいても許容時間(2.2秒)程度で制御棒が正常に挿入できることが確認されています。

図③-4 原子炉緊急停止(トリップ)時の制御棒動作(PWR)



問③-1 どんな状況下においても、制御棒は必ず挿入できるのですか。

【制御棒の挿入性】(図③-1-1)

制御棒は、非常にしなやかな細長構造物であるため、地震の影響により制御棒案内管が変形しても、その形に追従して挿入される仕組みとなっています。

【650 ガルでの制御棒の挿入性】

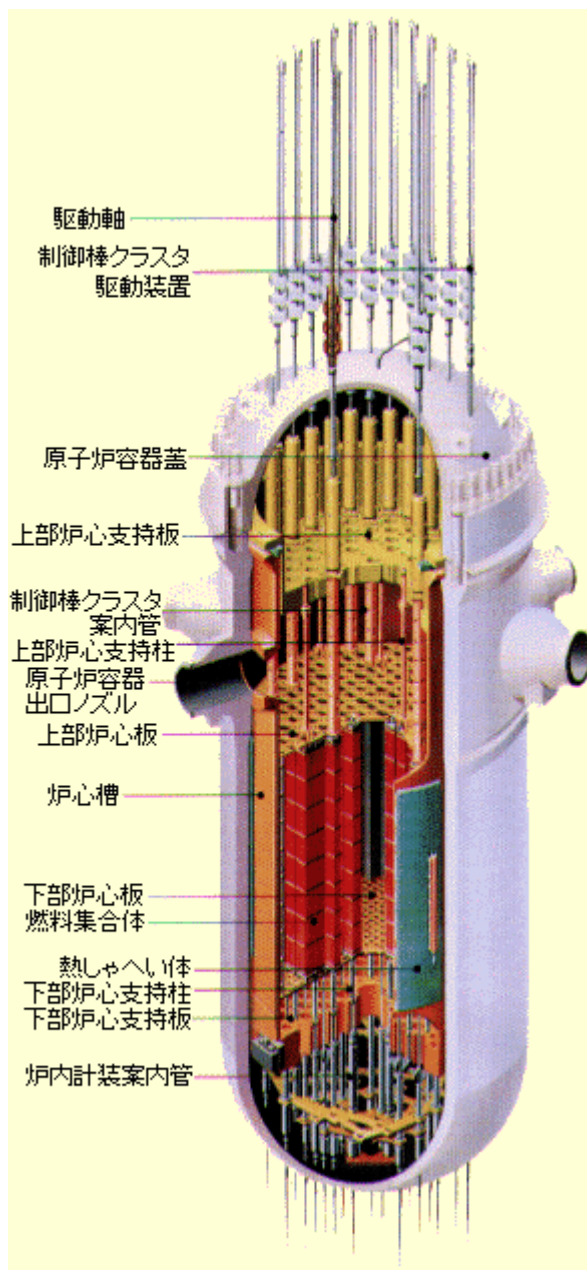
原子力規制委員会の工事計画認可においては、制御棒を 2.5 秒以内に燃料の間に挿入させることが求められています。

基準地震動 650 ガルの揺れを受けた時、伊方発電所 3 号機の制御棒は、原子炉を止める信号の発信から制御棒挿入開始までに 0.3 秒、制御棒挿入開始から挿入までに 2.09 秒、合わせて **2.39 秒**で挿入されると評価しており、**評価基準値 2.5 秒以内に収まる**ことが確認されています。

また、制御棒は原子炉を安全に停止するための重要な設備であることから、国の耐震信頼性実証試験のなかで、実機を模擬した加振試験が行われ、地震時においても確実に炉心へ挿入できることが確認されています。※

※：「平成 17 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 機器耐力その 2 (PWR 制御棒挿入性) に係る報告書」において、大規模加振条件下で制御棒挿入試験が実施されており、約 1560 ガルにおいても制御棒を確実に挿入できることが確認されています。

図③-1-1 加圧水型原子炉 (PWR) の構造



[四国電力(株)提供資料]



問③-2 万一、制御棒が挿入されなかった場合の対策はあるのですか。

【原子炉の自己制御性】（図③-2-1）

伊方発電所において、万が一、制御棒が全て挿入できないといった事態が発生した場合でも、原子炉には自己制御性という固有の安全性が備わっているため、核分裂反応は一定の状態に安定し、急激に出力が上昇することはありません。

自己制御性により、以下のとおり原子炉の出力が上昇した時（核分裂反応が増加した時）にも出力の上昇が抑制されます。

①核分裂反応が増加した時には核分裂反応が減少する方向に反応が進む

何らかの原因で核分裂反応が増加し、「一次冷却水」の温度が上昇すると、熱膨張により原子炉内を流れる「一次冷却水」の密度が小さくなり、原子炉内の速い中性子が水分子に衝突して減速する確率が減ります。その結果、ウランの核分裂に必要な遅い中性子が減ることになり、核分裂反応が減少します。

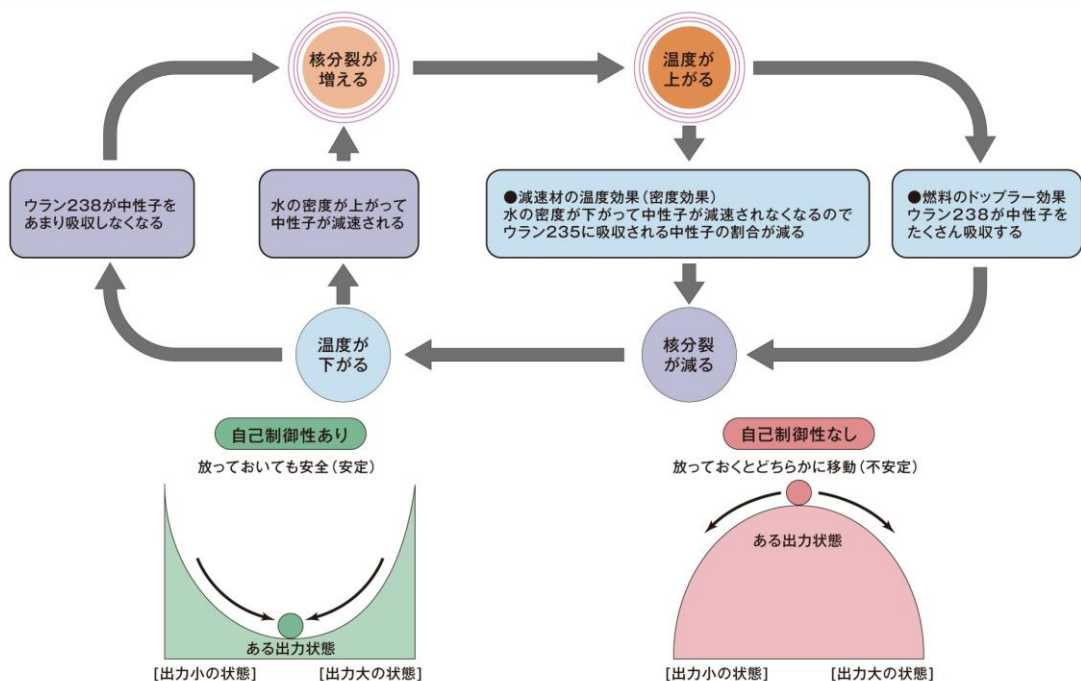
また、燃料自体の温度も上昇しますので、燃料を構成する「核分裂しやすいウラン 235」と「核分裂しにくいウラン 238」のうち、「核分裂しにくいウラン 238」が温度上昇により中性子を吸収しやすくなり、これも核分裂反応が減少する方向に作用します。

②核分裂反応が減少した時には核分裂反応が増加する方向に反応が進む

核分裂反応が減少すると、「一次冷却水」の温度が低くなり、原子炉内を流れる「一次冷却水」の密度が大きくなり、原子炉内の速い中性子が水分子に衝突して減速する確率が増え、ウランの核分裂に必要な遅い中性子が増えることになり、核分裂反応が増加します。

また、燃料の温度も下がることにより、「核分裂しにくいウラン 238」が中性子を吸収しにくくなり、これも核分裂反応が増加する方向に作用します。（→①へ戻る）

図③-2-1 原子炉の固有の安全性（自己制御性）



【制御棒が挿入されなかった場合の原子炉の停止】（図③-2-2、図③-2-3）

伊方発電所において、万が一、制御棒が全て挿入できないといった事態が発生した場合には、中央制御室※からの手動操作により主蒸気隔離弁を閉め、蒸気発生器から蒸気が逃げないようにします。蒸気の逃げ場がなくなることにより「二次冷却水」の温度が上昇し、除熱ができなくなった「一次冷却水」の温度も上昇します。「一次冷却水」の温度が上昇すると、原子炉の自己制御性によって核分裂は減少する方向に向かい、原子炉の出力が低下します。

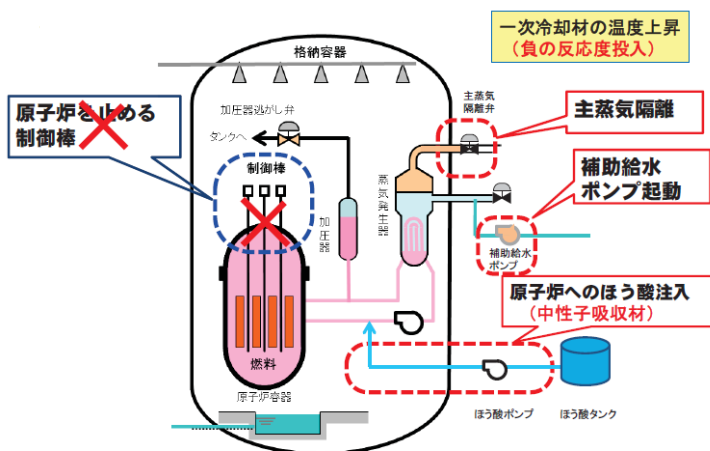
一方、蒸気の逃げ場がなくなることにより蒸気発生器内の圧力は上昇します。圧力が一定の高さになると安全弁が働き、蒸気を逃がすことによって水位が低下しますので、原子炉補助建屋に設置された補助給水ポンプにより蒸気発生器の二次側へ給水を行います。給水による除熱により、「一次冷却水」の温度が下がり、原子炉の自己制御性によって核分裂は一時的に増加する方向に向かいますが、速やかに一定の出力で安定します。

これらの操作により、約10分で原子炉の出力は8%程度まで下がり安定します。さらに、「一次冷却水」に中性子を吸収するほう酸水を中央制御室からの手動操作でほう酸タンクから注入し、原子炉を停止状態にできるようになっています。

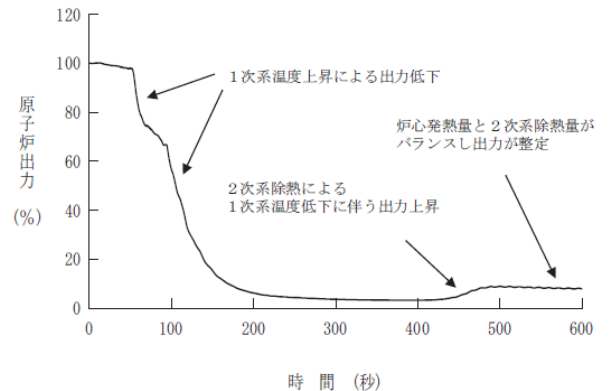
※中央制御室：発電所全体の運転状態を監視・制御する部屋で、原子炉、タービン、発電機などの運転、監視を行い、核分裂から発電までの主要な設備すべてをコントロールしています。さらに放射線の監視もここで集中管理しています。

原子炉の停止後は、引き続き補助給水ポンプを利用して蒸気発生器の二次側へ給水を行い、発生した蒸気を大気中に逃がすことで「一次冷却水」の温度をコントロールし、炉心を継続して冷却できるようになっています。また、放射性物質を含んだ「一次冷却水」と放射性物質を含まない「二次冷却水」は別の系統となっているため、「二次冷却水」はきれいな水であり、蒸気の放出により大気汚染は生じません。

図③-2-2 制御棒挿入失敗時の原子炉停止



図③-2-3 原子炉の自己制御性による原子炉出力の低下



[出典：愛媛県伊方原子力発電所環境安全管理委員会原子力安全専門部会 (H27. 7. 22) 原子力規制庁提出資料]

なお、伊方発電所3号機については、平成25年6月末までに実施された追加安全対策により、原子炉の自動停止（制御棒挿入）に失敗した場合でも、上記のタービン発電機、補助給水ポンプに係る一連の手動操作を全て自動化し、原子炉の出力抑制、安定的な冷却を行う、「**原子炉自動停止失敗時の影響緩和装置**」※を設置しています。

※原子炉自動停止失敗時の影響緩和装置：緊急時に自動信号を発信し、タービン発電機の停止や補助給水ポンプの自動起動により原子炉出力を低下させ、原子炉内の燃料を継続的に冷却することができる。（ほう酸水注入操作は除く）

こうした制御棒が挿入されなかった場合の対策は運転手順書で定めています。

運転員はその手順書に基づいて、松山市にある四国電力の「原子力保安研修所」という運転訓練の施設で、「制御棒が入らない」、「蒸気発生器のチューブが破断した」、「大きい配管が割れて一次冷却水が漏れた」といった色々なアクシデントが起こった場合を模擬して訓練などを実施しています。

問③-3 蒸気発生器の細管や、一次冷却水の配管が破損した場合の対応を教えてください。

**【蒸気発生器の伝熱細管破損】**

蒸気発生器の伝熱細管※が破損すると、「一次冷却水」側の圧力が高いため、水は「二次冷却水」側へ流出してしまい、「二次冷却水」に放射性物質を含んだ水が流れ込んでしまいます。

そのため、破損の起こった蒸気発生器の弁を閉め、放射性物質を含んだ「二次冷却水」やその蒸気を可能な限り蒸気発生器に閉じ込めるようにします。

伊方発電所3号機には蒸気発生器が3台あり、1台が破損した場合にも健全な蒸気発生器により十分な除熱が可能です。万が一、全ての蒸気発生器が破損した場合にも、余熱除去系統（余熱除去ポンプ等）などを用いた冷却操作が可能です。

※伝熱細管：高温の一次冷却水が流れている逆U字型の細いチューブ。いくつもの細管が二次冷却水と接触しており、この部分で一次冷却水の熱を二次冷却水に伝え、二次冷却水を蒸気に変える。

**【一次冷却水の漏えい】（図③-3-1）**

「一次冷却水」の配管が破損すると、「一次冷却水」が大量に流出し、「一次冷却水」の圧力が低下します。「一次冷却水」の圧力の低下の状況に応じ、非常用炉心冷却設備が作動し、ほう酸水が原子炉内に注入され、炉心の冷却が行われます。

①高圧注入系

「一次冷却水」の圧力がまだ高い時には、高圧注入ポンプによりほう酸水の注入を行います。

②蓄圧注入系

蓄圧注入系は高圧のほう酸水タンクとなっています。「一次冷却水」の圧力が下がってくると、より圧力の高い蓄圧注入系から自重でほう酸水が送り込まれます。ポンプは必要ありません。

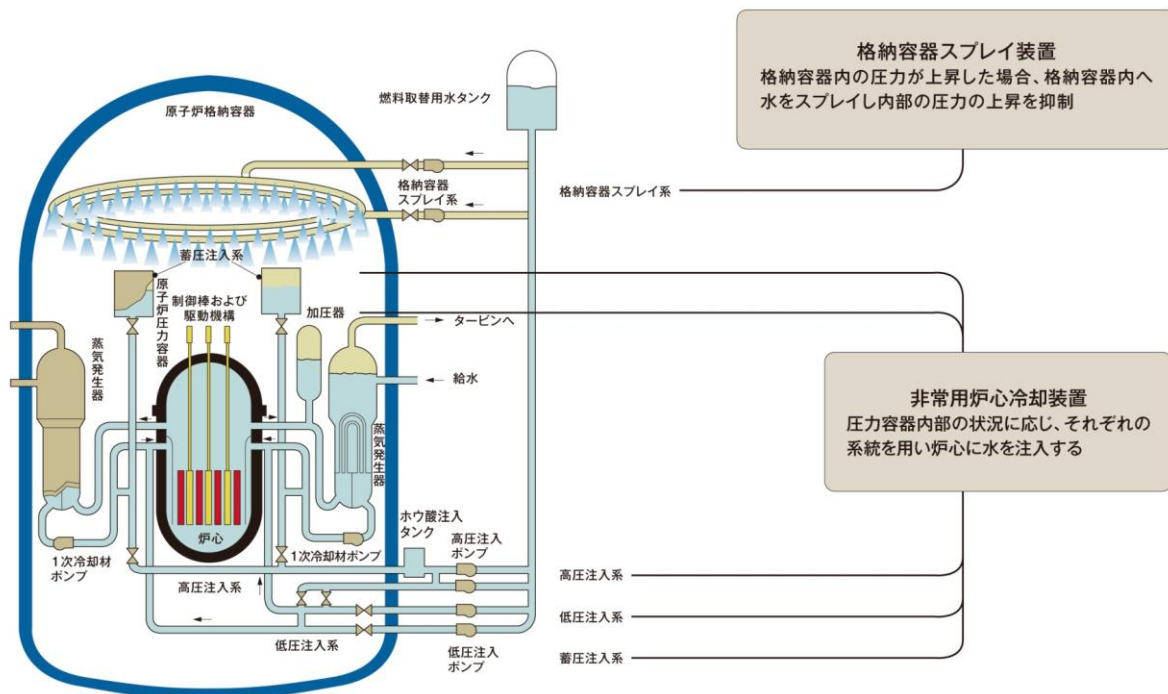
③低圧注入系

「一次冷却水」の圧力がかなり低下した場合には、低圧注入ポンプによりほう酸水の注入を行います。

非常用炉心冷却設備の水源である燃料取換用水タンクの水が低下すると、破損箇所より流出して格納容器の底にたまった「一次冷却水」やほう酸水を冷却し、再び原子炉に注入する仕組みとなっており、長期間の冷却に対応できます。

また、「一次冷却水」は高温・高圧のため、配管が破断すると一気に蒸発しますが、原子炉格納容器内の温度及び圧力の上昇抑制のため格納容器スプレイ装置が設置されています。格納容器スプレイ装置は格納容器の上部からほう酸水をシャワーのように降らせて、格納容器内に溜まっている蒸気を凝縮させて圧力を下げます。

図③-3-1 非常用炉心冷却装置



[出典：電気事業連合会ホームページ]