

BWRの仕組みと原発事故

2011.04.11

Modern Engineering & Design

水谷 守

BWRの仕組み

- ▶ BWR (Boiling Water Reactor = 沸騰水型原子炉)
- ▶ ^{235}U を原料に核分裂反応の熱を取出す
- ▶ 熱を利用して水蒸気を発生させる
- ▶ 水蒸気で Turbine 発電機を回す
- ▶ 少しの原料から膨大な熱が発生する

- ▶ 核分裂反応の制御が難しい
- ▶ 核分裂生成物質には有害なものがある

^{235}U の核分裂反応

^{235}U +中性子 → 2核分裂生成物+複数の中性子+熱

- ▶ 核分裂生成物 ^{95}Y , ^{139}I , ^{135}I , ^{141}I , ^{133}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ...
 - 様々な物質があり、不安定な自己崩壊性の元素が多い
 - 自己崩壊 放射線を放出・獲得しながら安定元素へ変化
 - 半減期 安定元素に変化する時間の指標
 - 放射線 α線、β線、γ線、中性子線 = 生物に有害
- ▶ 中性子は2個以上放出される
- ▶ 熱量は膨大である
- ▶ 核分裂 多数の放射性物質と放射線が存在する

熱を利用して水蒸気を発生

- ▶ 燃料棒内の ^{235}U が核分裂 = 熱の発生
 - 核分裂生成物は燃料棒(筒状)内に留まる
- ▶ 燃料棒の熱 周囲の水を加熱する
 - 純水を利用することで放射性物質の発生を抑える
- ▶ 加熱された水 水蒸気
 - 水蒸気内には多少の放射性物質が含まれる
 - 配管を通じて炉外(Turbine)へと導かれる
- ▶ 発生する水蒸気温度はさほど高くない
 - 炉心内気圧があまり高くないため

Turbine 発電

- ▶ 基本的に火力発電と同じ
- ▶ BWR で発生する水蒸気は温度が低い
 - 低圧の大型 Turbine を使用
 - 発電効率はさほど高くない
 - 全体としての発電量は非常に大きい
- ▶ 水蒸気には放射性物質が含まれる
 - Turbine Cycle も管理が必要
- ▶ 水蒸気は水に戻され、炉心に再注入される

膨大な発熱量

- ▶ 核分裂による発熱は質量エネルギーである
 - $E=mc^2$
- ▶ 1 g の ^{235}U から $8.2 \times 10^{10}\text{J}$ ($1.95 \times 10^7\text{kcal}$) 発生
 - 完全に核分裂した場合で、実際は数分の一
 - 発電効率はさほど高くない
- ▶ 燃料として考えると ^{235}U は非常に安価である
- ▶ 資源に乏しい日本では原子力発電は有用
- ▶ 2 酸化炭素を出さない発電として環境性に優れる

核分裂反応の制御

- ▶ 核分裂の発生中性子を一つだけ次の分裂に利用
 - 安定した連鎖反応(臨界状態)を維持する
 - 一つ以上の中性子が作用すると累加的核分裂 爆発
- ▶ 制御棒は中性子を吸収する
 - ホウ素は中性子を吸収する性格がある
 - 炉内の中性子密度を一定に保つ
- ▶ 中性子の速度が速すぎると連鎖反応が起きない
 - 減速材(水)を用いて中性子の速度を落とす
 - 炉内温度が高くなると連鎖反応が止まる = 固有安全性

放射性物質の隔絶

▶ 構造的多重防護

- 燃料棒、圧力容器、格納容器、建屋、離隔距離
- 大部分の放射性物質は燃料棒内に留まる
- 燃料棒は鋼鉄製の圧力容器内に納められている
- 圧力容器は鋼鉄製の格納容器内に、格納容器はRC製の建屋内に収められている
- 原子炉は人口密集地帯から離れて設置される

▶ 炉内圧力が高まると圧力逃し弁を開く

- 異常事態の場合 圧力容器 格納容器 フィルター 環境
- 燃料棒が健全であれば放出放射性物質は少ない

BWRの事故の進展

- ▶ 炉心の異常時 連鎖反応の停止(炉停止)
- ▶ 炉心の冷却 成功すれば事故の進展は止まる
 - 失敗した場合炉心温度の上昇が続く
- ▶ 燃料棒の加熱による水素の発生
- ▶ 水素の漏洩による水素爆発
- ▶ 炉心損傷 燃料棒の破損
- ▶ 大規模溶融
 - 水蒸気爆発 圧力容器、格納容器の破壊
- ▶ 大規模環境汚染

炉停止

- ▶ 原子炉の連鎖反応を止める
- ▶ 制御棒の全挿入
 - 中性子を吸収することで核分裂の連鎖反応を止める
- ▶ Poison (ホウ素)の投入
 - 制御棒に問題があった場合に利用
- ▶ 炉停止はさほど難しいことではない

炉心冷却

- ▶ 炉停止後、燃料棒内の核分裂生成物から熱が発生
- ▶ 冷却しないと炉心が高温になる
 - 使用済み燃料からも崩壊熱は発生している
- ▶ ECCS (緊急炉心冷却装置) が存在する
 - 低圧注入系・スプレー系 高圧注入系・スプレー系他
 - 炉内圧力が高いと十分に働かない
- ▶ 圧力逃し弁により炉内圧力を低減
 - 環境に放射性物質を放出する
- ▶ 炉心冷却は事故対応の最重要点である

水素の発生と水素爆発

- ▶ 高温化で燃料棒被覆と水蒸気が反応 水素発生
 - 高温金属は酸化するため水から酸素を奪い水素を発生
- ▶ 圧力逃し弁の開放や配管損傷により水素放出
 - 水素が格納容器や建屋内に漏洩・蓄積する
- ▶ 水素と空気(酸素)が混合すると爆発
 - 混合気に何らかの着火源があると爆発する
 - 通常格納容器は窒素で満たされている
 - 格納容器が事前に損傷していれば爆発の可能性
- ▶ 爆発により格納容器や建屋の隔絶性が損傷する

炉心損傷と溶融

- ▶ 炉心温度が上昇すると燃料棒が融ける
- ▶ 燃料棒が融けると内包する核分裂生成物が漏洩
 - 圧力容器内に核分裂生成物(放射性物質)が放出される
 - 高温で溶融した核分裂生成物が互いに混合する
- ▶ 燃料棒損傷が進むと炉心溶融となる
 - 高温の溶融物は炉内構造物や圧力容器底部を溶かす
 - 大量の高温溶融物が炉内の水に落ちると水蒸気爆発
- ▶ 圧力容器の破損 格納容器内に大量の放射性物質
- ▶ その後格納容器でも同じ事態が進行

大規模環境汚染

- ▶ 圧力容器・格納容器・建屋の損傷は大規模環境汚染
 - 構造的多重防護の崩壊
 - 大気中に大量の放射性物質が放出される
- ▶ 放射性物質 = 放射線を出す物質
 - ^{141}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr などが有名
 - 単位 becquerel 一秒間に崩壊する放射性原子核の個数
 - 放射性物質は広範に拡散する
- ▶ 放射線 = 生物に悪影響を及ぼす
 - 単位 $\text{Sv}=\text{J}/\text{kg}$ 1kgあたりの吸収エネルギー量
 - 周囲に放射性物質が多ければ放射線量は増える