

## 軽水炉のシビアアクシデントにおける炉心溶融および移行

### Core Meltdown and Relocation in Light Water Reactor Severe Accident

電中研 ○尾形 孝成

CRIEPI ○Takanari Ogata

E-mail: pogata@criepi.denken.or.jp

福島第一原子力発電所 (1F) 1~3 号機で起きたシビアアクシデント (SA) では、炉心の核燃料が被覆管や構造材などと共に溶融し、その一部は圧力容器を貫通して格納容器底部に達したものと見られている。その後、溶融した物質の発熱 (崩壊熱) は低下し、注水等により冷却されて、凝固した状態にあると考えられる。この核燃料を含む凝固物は、国内では「燃料デブリ」と呼ばれている。現在、1F の 1~3 号機からの燃料デブリの取出しに向けて、がれきの除去、格納容器内部の観察、炉内状況の推定など様々な現地作業や研究開発が精力的に進められている。また、1F 事故の後、SA に関する解析コードの改良や模擬試験など、SA 対策に関する新たな研究開発が国内で始められている。

軽水炉の SA における事象推移は、原子炉の型式や起因事象によって若干の違いがあるが、概ね次のとおりと考えられている。SA の起因となる冷却材喪失事故や全電源喪失事故では、制御棒の挿入や負の反応度フィードバックにより原子炉の核分裂連鎖反応は停止するものの、崩壊熱の除去に失敗すると、燃料集合体、制御棒およびその他の炉内構造材の温度が上昇し、これらが相互に反応して一部が溶融する。例えば、被覆管の主成分である Zr の融点は 1800°C 以上であるが、Zr とステンレス鋼の主成分である Fe との間には約 940°C と約 1300°C に共晶点がある。Zr 合金の被覆管の水蒸気による酸化反応は、1200°C 程度を超えると激しく進行することが知られており、この酸化反応熱によって炉内の温度が急上昇し、被覆管や構造材の融点を超え、さらには核燃料である  $\text{UO}_2$  の溶融に至る。 $\text{UO}_2$  の融点は約 2850°C であるが、 $\text{UO}_2$  は溶融した被覆管に溶解する。また、 $\text{UO}_2$  と  $\text{ZrO}_2$  の混合物は混合比によっては 2600°C 程度で溶融を始める。損傷が拡大した炉心では、燃料棒の破損と崩落、溶融物の流下と再凝固などによって熱伝達が劣化した領域が形成され、その内部では一定規模の溶融物の溜まり (プール) が生じる。溶融物が何らかの原因によって圧力容器の底部に移行し、熱的な損傷によって圧力容器が破損すると、破損孔を通じて溶融物が流下し、格納容器底部のコンクリートと反応する。これらの一連の現象によって、様々な酸化物や合金などが形成される。そのため、「溶融物」「燃料デブリ」などと総称される物質は、事象進展や存在場所によって特性や性状が大きく異なるもので、燃料棒の断片であったり、酸化物と合金の混合物であったり、様々である。上記のような SA 時の原子炉内の挙動は、1979 年の米国スリーマイル島原子力発電所 2 号機 (TMI-2) における炉心溶融事故の後の炉内状況の分析や解析などによって明らかにされた。

TMI-2 事故以来、近年に至るまで、研究炉等を用いた燃料溶融試験や燃料加熱試験など SA に関する実験が米国、欧州、日本などで行われており、燃料集合体の破損-溶融過程、核分裂生成物 (FP) の放出挙動、圧力容器底部における溶融燃料の挙動、溶融燃料とコンクリートとの相互作用 (MCCI) などが詳細に調べられてきた。例えば、使用済燃料の一部を加熱して FP 放出挙動を調べる実験の結果、希ガス、Cs、I は約 2300°C 以上ではほぼ全量が燃料から放出されることがわかっている。したがって、1F 1~3 号機では、炉内にあったこれらの元素は殆どが燃料外に放出され、一部は格納容器内に残留し、一部は環境中に放出されたものと考えられる。Ru、Ce、Np、Eu、Sr、Zr、Nb、La、Nd 等は揮発性が低いと考えられているが、空気の混入などで酸化性となった雰囲気では揮発性になる元素もある。MCCI に関係する現象には、コンクリートの高温挙動と分解、溶融物のガスバブルによる攪拌効果、コンクリートの溶融と溶融物への混合、溶融物の凝固に伴う溶融物組成の変化、溶融物上面および溶融物とコンクリートとの界面に形成されるクラスト層の挙動、金属成分の酸化および酸化反応に伴う発熱などがある。MCCI の特徴はこれらが強く関連し合っている点にある。また、コンクリートには、珪質系、玄武岩系、石灰質系などいくつかの種類があり、MCCI 挙動がコンクリートの種類によって異なる点にも注意が必要である。

このように、SA における現象は複雑なものが多いが、これらをモデル化して、溶融進展挙動、FP の環境への放出などを解析するコードも開発されている。