

極限荷重に対する原子炉構造物の破損メカニズム解明と 破局的破壊防止策に関する研究開発

研究代表者 笠原 直人 国立大学法人東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
参画機関 国立大学法人東京大学、独立行政法人防災科学技術研究所、株式会社テブコシステムズ、
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
研究開発期間 平成24年度～27年度

1. 研究開発の背景とねらい

福島原子力発電所事故の教訓として、「事故が起こらないように設計する」から「事故が起こることを前提とした設計と対策」への明瞭な意識の転換が必要となっている[1]。また、IAEA 基準の改定案では、設計基準事故 (DBA) を超える事故 (Beyond DBA) を設計拡張状態 (DEC) とし、DBA に対しては保守的な評価を用いるのに対し、DEC に対しては最適評価を行うこととしている[2]。

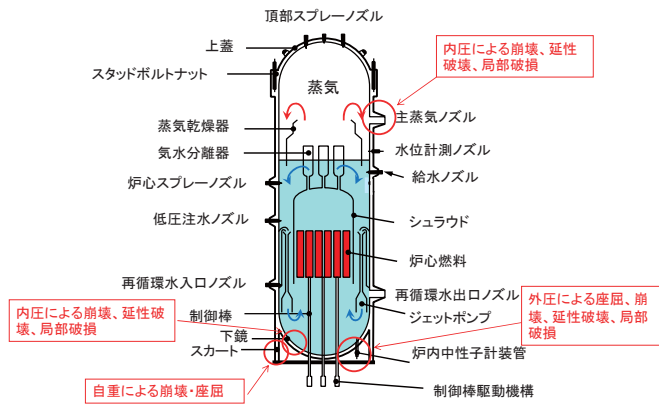
これに対して、シビアアクシデントや巨大地震など従来想定してなかった極限荷重に対する、原子炉構造物の壊れ方ははっきり分かっていない。事故を想定した設計とマネジメントの実現には、壊れる場所と順番、限界強度、壊れた場合の影響度などの破壊現象の解明が求められる。

本研究ではまず、シビアアクシデントや巨大地震時に原子炉で想定される、過温過圧および強振動荷重下の原子炉構造物の破壊メカニズムを、破壊試験および数値解析により調べて整理する。次に、その結果に基づいて、強度の支配因子とその不確実性を考慮した解析による限界強度評価法を提示する。さらに、以上の結果から得られる破壊メカニズムに関する知見と限界強度評価法を応用して、過温過圧および強振動荷重に対する原子炉構造物の破局的破壊防止策を作成する。本報では2012年秋からの進捗状況と2015年度末までの計画について述べる。

2. 研究開発成果

2. 1 極限荷重の性質と破損モードの整理

従来の設計基準では想定外としていたため不明点が多い極限荷重の特徴を明らかにするため、国内外の原子力設備破損事故の調査、福島第一原子力発電所事故のシビアアクシデント解析および地震動解析に基づき荷重モードを分類整理した。また、荷重モード毎に引き起こされる破壊モードとその支配因子を明らかにするため、事故に関連した研究開発の調査に基づき破壊想定箇所と破壊モードの整理を行った。ここで、事故の起回事象は種類が多くこれらを全て網羅することは難しいことから、住民の健康と環境への影響の大きい破壊箇所と破壊モードをまず考え、そこから遡って荷重モードとその起回事象を整理することを試みた。シビアアクシデントおよび巨大地震荷重による代表的な想定破壊箇所を図1に示す。また、設計時と設計を越える極限荷重下で考えられる破壊モードの違いを図2に示す。極限荷重下では、設計時とは異なる破壊モードを想定する必要がある。また、放射性物質に対するバウンダリ破損に結びつく破壊モードと、変形などのバウンダリ破損に間接的に影響するモードを区別する必要がある。従来の設計時の評価では、全ての破壊モードについて安全側の評価をすれば良いことからこれらの区別の必要性は高くなかった。



加速度および繰り返し変位によるエルボ部、ノズル部の、崩壊、延性破壊と疲労き裂を想定

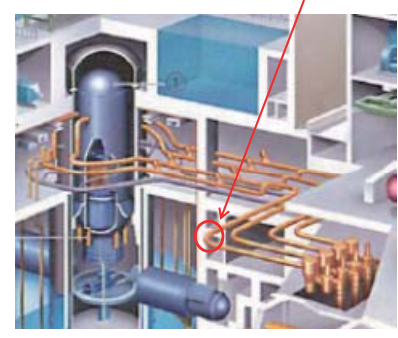


図1 シビアアクシデントおよび巨大地震荷重による想定破損箇所

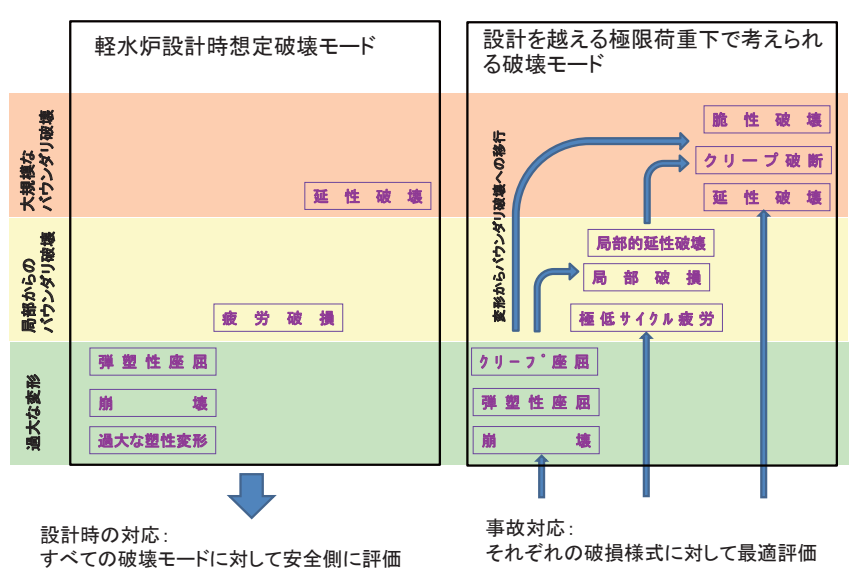


図2 設計時と設計を越える極限荷重下で考えられる破壊モードの違い

2. 2 破壊メカニズム解明のための試験計画

(1) 過温過圧荷重による破壊モード

図2に整理した極限荷重下で考えられる破壊モードの中の、過温過圧荷重による破壊のメカニズムについて、必ずしも明らかでない項目として以下のようなものがある。

- ・ 高圧荷重によりバウンダリ破損に至る破壊モードは、延性破壊（大域的な負荷により構造全体に大きな塑性変形を伴って生じる破壊）と局部破損（塑性変形が拘束された局部にて静水圧応力成分によって生じるカップアンドコーン型破損）のいずれが卓越するのか
- ・ 崩壊、座屈などによる過大変形から、バウンダリ破損に発展する条件は何か
- ・ 温度や衝撃荷重（ひずみ速度）が、どのように破壊に影響するのか

これら疑問に答え破壊メカニズムを解明するため、図3の段階的試験計画を立て一部着手した。

- ① 実機材料の室温と高温の応力-ひずみ関係を小さな荷重で模擬するための、鉛合金を使用した基礎試験により、基本形状と材料特性などの幅広い条件下での破壊モードの変化を把握する。
- ② 炉内構造物を模擬した構造要素試験により、破壊のメカニズムを理解する。
- ③ 原子炉構造物を模擬した小規模構造物試験により、破壊限界強度を把握する。

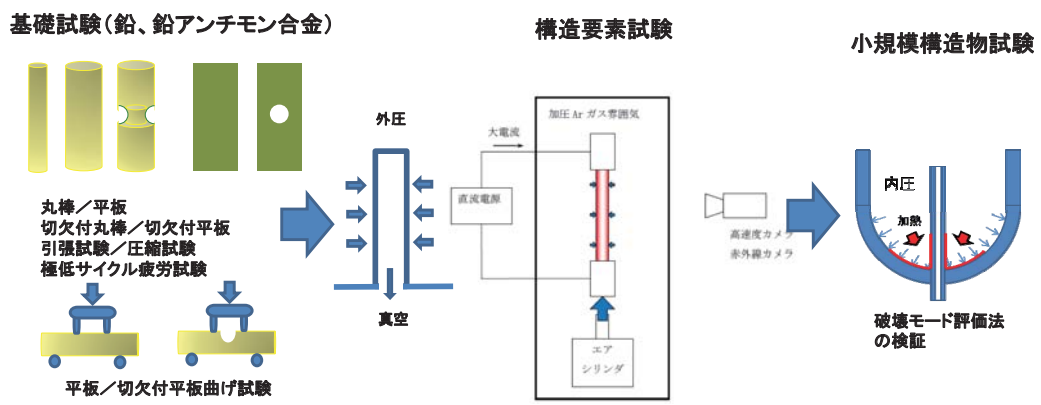


図3 過温過圧荷重による破壊メカニズム解明のための試験計画

(2) 強振動荷重による破壊モード

図2に整理した極限荷重下で考えられる破壊モードの中の、強振動荷重による破壊のメカニズムについて、必ずしも明らかでない項目として以下のようなものがある。

- ・地震荷重による配管破壊モードは、最大加速度による崩壊・座屈・破断（従来の設計想定）とひずみの繰り返しで生じる疲労き裂の発生と進展（最新規程 JEAC4601[3]による想定）のいずれが支配的か（図4参照）
- ・崩壊、座屈などによる過大変形から、バウンダリ破損に発展する条件は何か
- ・温度やひずみ速度が、どのように破壊に影響するのか

これら疑問に答え破壊メカニズムを解明するため、図5の段階的試験計画を立て一部着手した。

- ① 鉛合金と一自由度系を用いた基礎試験により、入力波形・応答特性・材料強度などの組み合わせと破壊モードの関係を把握する。
- ② 配管要素試験により、破壊のメカニズムを理解する。
- ③ 配管系を模擬した小規模構造物試験により、破壊限界強度を把握する。

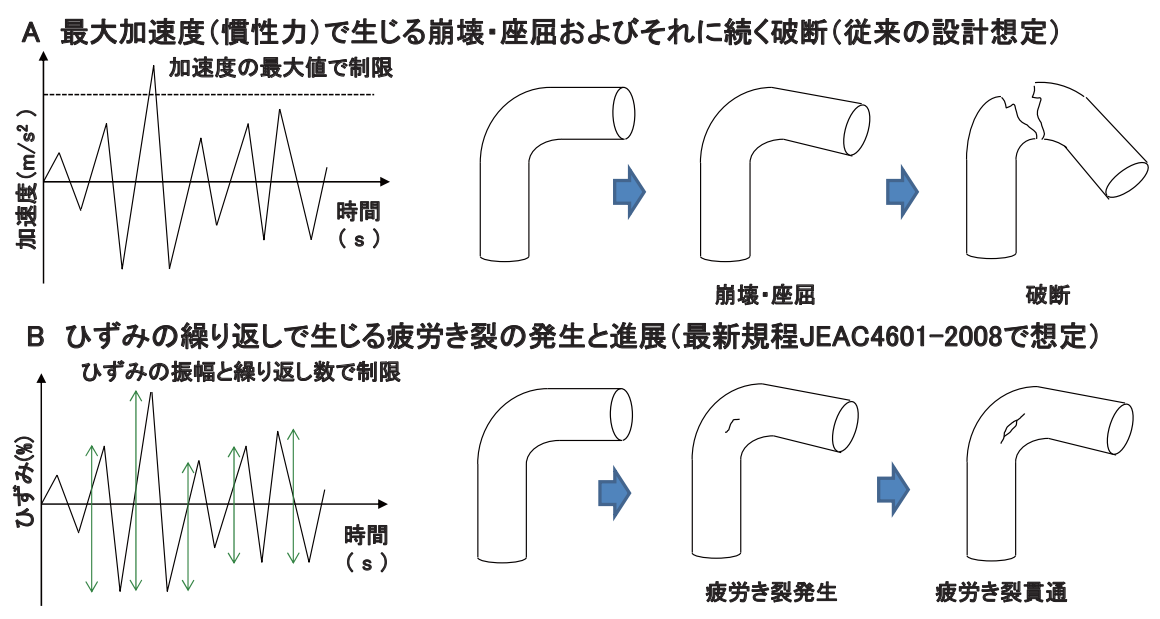


図4 強振動荷重による配管破壊モードの違い

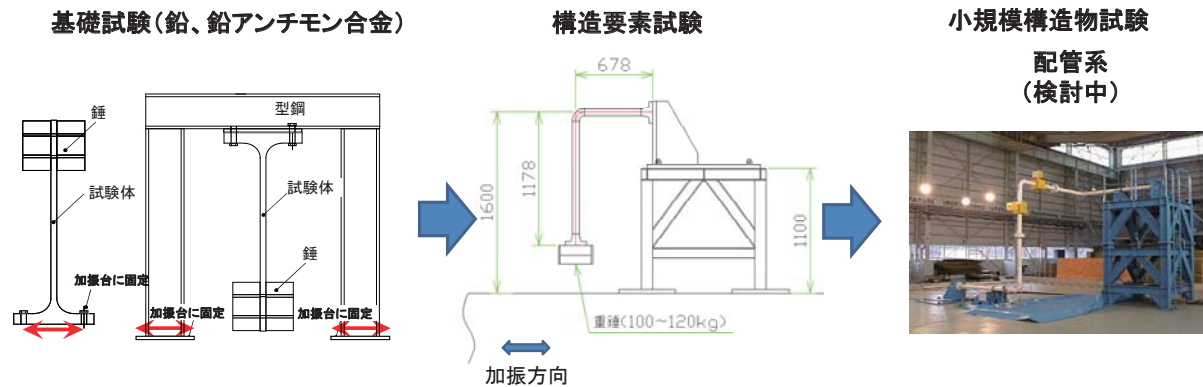


図5 強振動荷重による破壊メカニズム解明のための試験計画

3. 今後の展望

(1) 極限荷重の性質と破損メカニズムの解明

本稿執筆時における2013年11月現在では、基礎試験に関する結果が一部出てきた段階であり、今後2014年度にかけて構造要素試験を実施する。2015年度には小型構造物試験を実施する。これらを通して破壊メカニズムを解明し、その知見を以下に述べる解析による限界強度評価法の開発に反映させる。

(2) 解析による限界強度評価法の開発

上記で明らかにした破壊の支配因子（応力、塑性ひずみ、等）を非線形有限要素解析により高精度で予測する方法を開発する。特に予測の難しい繰り返し硬化を考慮した弾塑性ひずみを、従来の簡易解析法に比較して誤差数分の1以下で予測する方法を開発する。

また、破壊モード毎に、荷重と強度の支配因子に基づき限界強度を評価する方法を開発する。ここで、その他の因子による荷重と強度の不確実性が破損へ及ぼす影響を考慮するため、破壊までの裕度を確率論に基づき定量化する方法を提案する。

(3) 破局的破壊防止策

甚大な被害をもたらす事故に対しては、発生確率にかかわらずしかるべき安全対策・防災対策を立てておくべきである[1]。設計拡張状態(DEC)に対して原子炉構造物の破損順序を制御することで、小規模放射性物質放出に留まる局部破壊によって受動的に荷重を緩和し、放射性物質の大量飛散を招く破局的破壊を防止する方策を提案する。

4. 参考文献

- [1] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会、最終報告書、2012年7月
- [2] IAEA SSR-2/1, Safety of Nuclear Power Plants: Design Specific Safety Requirements(2012)
- [3] 日本電気協会原子力規格委員会、原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601 (2008)