

破壊制御技術導入による
大規模バウンダリ破壊防止策に関する研究
—設計（深層防護第1層～第3層）とは異なる
設計を超える状態（第4層）のための構造強度研究—
(受託者) 国立大学法人東京大学 (研究代表者) 笠原直人 工学系研究科
(再委託先) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
国立研究開発法人防災科学技術研究所
(研究期間)平成28年度～31年度

1. 研究開発の背景とねらい

1.1 背景

事故の頻度と被害規模は図1のように連続分布するが、従来我が国は二者択一的判断を求める傾向があり、設計想定内で事故防止に努める半面、設定想定外への対策が不十分であった。福島原子力発電所事故の教訓として、「設計（深層防護の第1層から第3層）」に加えて、事故が例え起こったとしても影響を緩和しその拡大をサイト内で防止するための「設計を超える状態（第4層）」への重点的な取り組みが要求されている。[1][2]。設計を超える状態に対する防護対策の例として、プラント弱点把握（ストレステスト）、リスク評価、影響緩和（事故進展時間の遅延、レジリエンス向上）などが挙げられる。

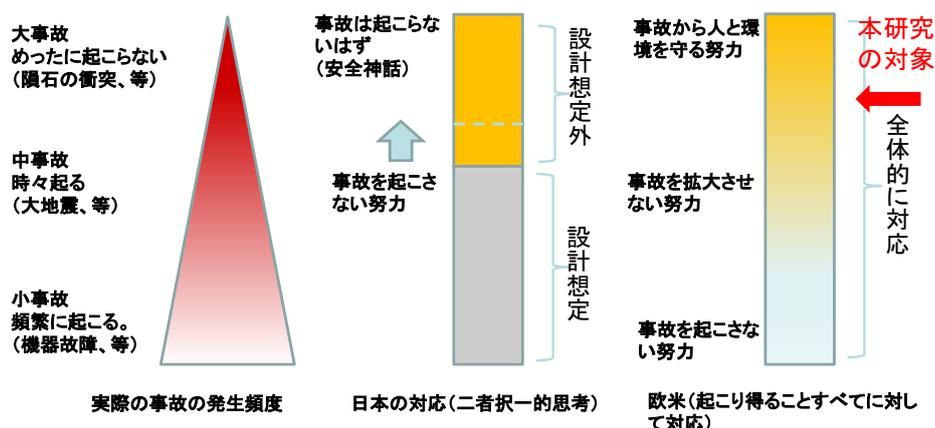


図1 設計を超える状態（深層防護第4層）への取り組み

1.2 ねらい

従来の、設計のための構造強度研究は、保守的な評価、つまり壊さないことを目的としたものであった。本研究の新規性は、これらと一線を画す設計を超える状態（第4層）に対する、破壊による被害を低減させる新しいアプローチにある[3]。破壊制御は、航空機や自動車の分野で損傷許容設計がさらに発展した先進技術である。化学プラントの世界でも一部に使われている。原子力の世界では破断前漏洩(LBB)論理が類似の考え方に基づくものである。図2に、化学プラントへの適用例を示す。コーンルーフトankの屋根と側板の取付け部の強度は、側板自体や側板と底板の取付け強度より、相対的に弱いものにしてある。これにより、内圧が上昇した場合、屋根との接続部が壊れて減圧して側板を守ることで、液を外部に漏らさない[4]。破壊制御技術の導入により、設計を超える状態に対するレジリエントな性質を備えた、独創的原子力プラントが実現できる。図3に示す高温高压でも延性破壊を起こさない容器と、過大地震でも崩壊・破断を起こさない配管はその構想例である。

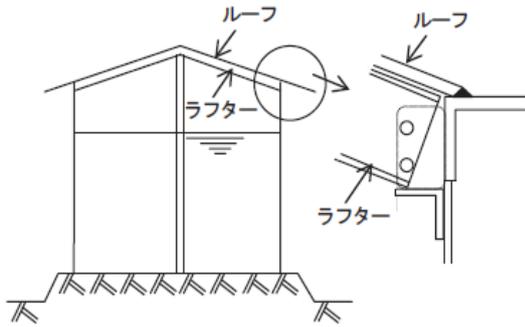


図2 破壊制御(Fracture Control)の化学プラントへの適用例[4]

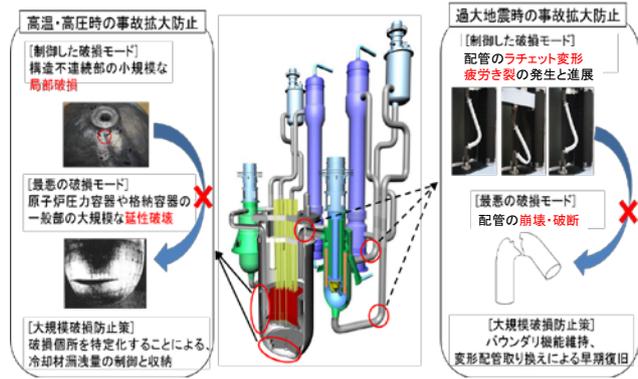


図3 高速炉を対象とした場合の事故拡大防止策の具体例

2. 全体研究計画

全体研究計画を表1に示す。高温・高圧時の破壊制御技術を、破壊クライテリアの提案、基礎試験、構造物試験の段階を追って開発する。同様のステップで、過大地震時の破壊制御技術を開発する。次にこれらを統合して大規模バウンダリ破壊防止法の提案を行う。具体的には、設計基準外事象に対する破壊防止ガイドラインを作成する。また、研究推進用のため日本溶接協会に外部評価委員会を設置する。

表1 全体研究計画

実施項目	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
I. 高温・高圧時破壊制御技術	I-a. 高温・高圧破壊クライテリア(JAEA)			
	I-b. 高温・高圧破壊基礎試験			
	I-c. 高温・高圧破壊構造物試験			
II. 過大地震時破壊制御技術	II-a. 振動破壊クライテリア			
	II-b. 振動破壊基礎試験			
	II-c. 振動破壊構造物試験(防災科研)			
III. 大規模バウンダリ破壊防止法の提案	III-a. 設計基準外事象に対する破壊防止ガイドライン			
	III-b. 国際会議における討論の主導			
IV. 研究推進	▼▼	▼▼▼	▼▼▼▼	▼▼▼▼

3. これまでの研究成果

3.1 高温・高圧時破壊制御技術

報告者らは、これまでに高温・高圧荷重下における弾塑性領域の破壊モード(延性破壊か、局部破損か)を判定する方法として、塑性破壊曲面を提案している[5]。本年度は、適用範囲をクリープ領域に拡大したクリープ破壊曲面(静水圧応力、ミーゼス応力、時間、温度がパラメータ)の開発を進めている(図2)。これにより、クリープ局部破損がクリープ破断に先行して起こる条件を判定できるようになる。

また、局部破損によって生じたき裂が、破局的破壊に至る全周き裂に発展しにくいことを明らかにするために、図3に示す予き裂付原子炉容器模擬構造物試験による、局部破損からのき裂進展挙動観察を開始している。

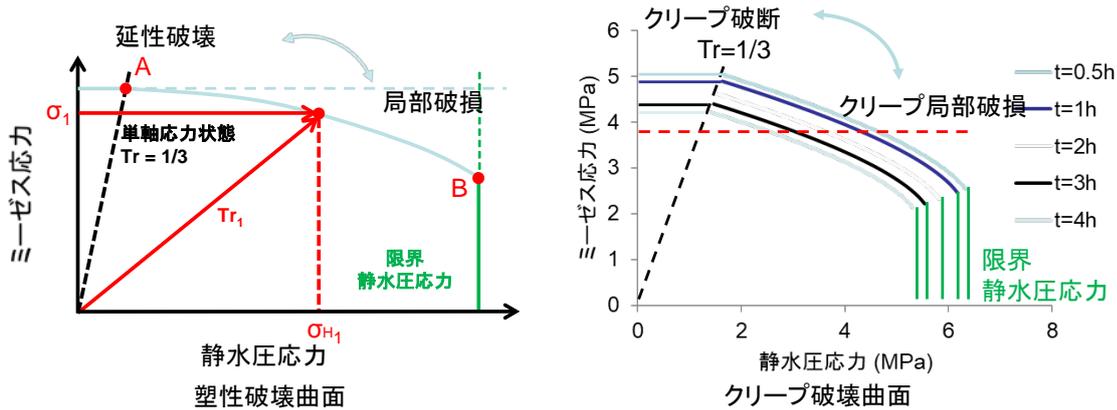


図2 塑性破壊曲面を拡張したクリープ破壊曲面の開発

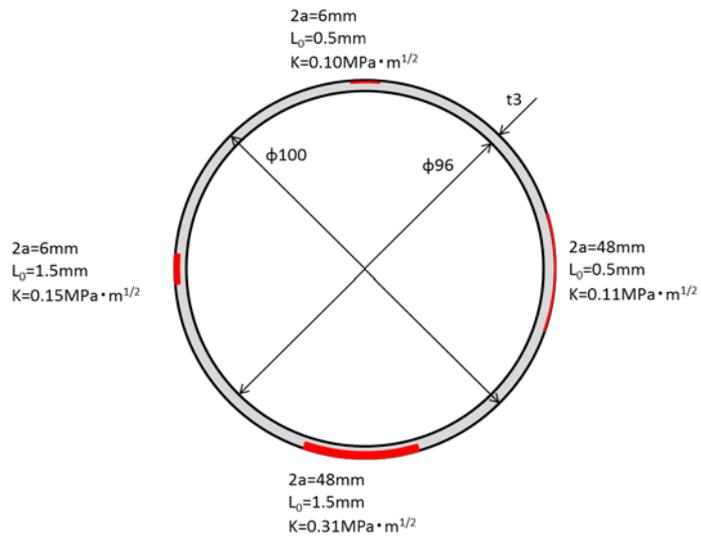


図3 予き裂付原子炉容器模擬構造物試験による局部破壊からのき裂進展挙動観察

3. 2 過大地震時破壊制御技術

報告者らは、過大地震時によって配管に引き起こされる破損モードの中で、被害の小さいラチェット変形と、被害の大きい崩壊や破断の優先順位を、配管系の応答特性と地震動の特性に応じて評価する破壊モードマップ[5]を提案している。今年度は、図4に示すように設計で許容する無損傷状態、設計条件を超えた場合に安全機能維持に影響の無いラチェット変形が起る領域、機能喪失に繋がる崩壊が生じる領域を判定するための、破壊モードマップ(静的荷重制御型応力、繰り返し加速度、周波数がパラメータ)を基礎試験データと解析的検討に基づき提案した。

さらに、破壊モードマップの実際の配管構造物への適用性を明らかにするため、配管エルゴ試験体の振動破壊試験を進めている。自重、振動加速度、振動周波数により、発生する破壊モードが変化する様子が観察される。図5は配管の振動破壊試験体と配管の崩壊が観察された例である。

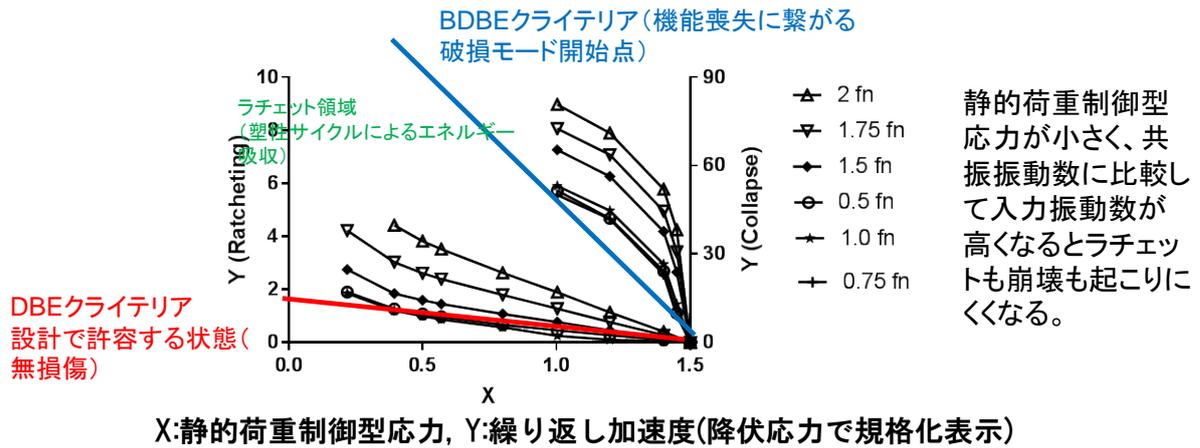


図4 配管のラチェット変形と崩壊の破壊モードマップの提案



図5 配管エルボの振動破壊試験体と崩壊が観察された例

4. 今後の研究

次年度は、高温・高圧時破壊制御技術について、クリープ破壊曲面の実機に近い構造物への適用性を確認する。また、実際の容器構造を模擬した構造物試験による、き裂の進展挙動の観察を行う。

過大地震時破壊制御技術に関して、配管のラチェット変形と崩壊の破壊モードマップの実際の配管系への適用性を確認するため、複数エルボと支持点からなる配管系の振動破壊試験の予備試験を行う。

これらを統合して大規模バウンダリ破壊防止法の提案を行ため、実プラントへの破壊制御技術の適用法を、シミュレーション解析により検討する。

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 (2012) Rev.1(2016) Safety of Nuclear Power Plants: Design Specific Safety Requirements
- [3] Naoto KASAHARA, Izumi NAKAMURA, Hideo MACHIDA, Chuanrong JIN, Koji OKAMOTO, Takuya SATO, Structural analysis approach for risk assessment under BDBE, ASME, PVP2016-63416 (2016)
- [4] 佐藤拓哉、圧力設備の破損モードと応力、日刊工業出版(2013)
- [5] Naoto KASAHARA and Takuya SATO, Difference of strength evaluation approach between for DBE and for BDBE, ASME, PVP2017-65478 (2017)