

外的事象に対する包括的な安全確保の体系の現状と課題

(4) 自然事象に対する研究開発と実務への適用

「2018年春の年会 原子力安全部会、標準委員会合同セッション」

2018年3月27日

電力中央研究所
原子力リスク研究センター (NRRC)
梅木 芳人

はじめに

- 原子力リスク研究センター(NRRC)の研究開発の概要
- 自然事象のリスクにかかる研究開発

原子力リスク研究センター(NRRC)の研究開発 の概要

NRRC設置の経緯

福島第一原子力発電所事故を踏まえた反省

- ・ 原子力のリスクと正面から向き合う意識と仕組が不足
- ・ 大地震、大津波など低頻度だが影響が大きな事象への対応が不十分



リスクを直視し、規制遵守に留まることなく安全性を追求する意識と仕組が必要



各事業者のリスクマネジメント強化

- ・ 社内体制整備
- ・ リスク評価の充実（確率論的リスク評価：
Probabilistic Risk Analysisの活用）
- ・ リスク情報の積極的利用 等



（各事業者が継続的に実施）



低頻度事象に伴うリスクの低減

- ・ 技術課題解決（発生メカニズム、応答、対策）
- ・ 決定論的手法と確率論的手法の効果的な組合せ
- ・ 一元的研究開発体制構築→現場適用&フィードバックを促進 等



NRRCの設置 2014. 10. 01

ねらい、ミッション・ビジョン

2014. 06. 13 電中研プレスリリースより

ねらい

- ・ 事業者の自主的な安全性向上の取り組みに必要な研究開発の中核に。
- ・ 低頻度ではあるが大きな被害をもたらす事象を解明し、対策を立案してリスク低減に役立てるため、確率論的なリスク評価手法（PRA）も積極的に活用。
- ・ 研究開発ロードマップを策定し、成果の利用までを含めたPDCAを回して効果的に研究開発を推進。

2014年10月 NRRC作成、HP掲載

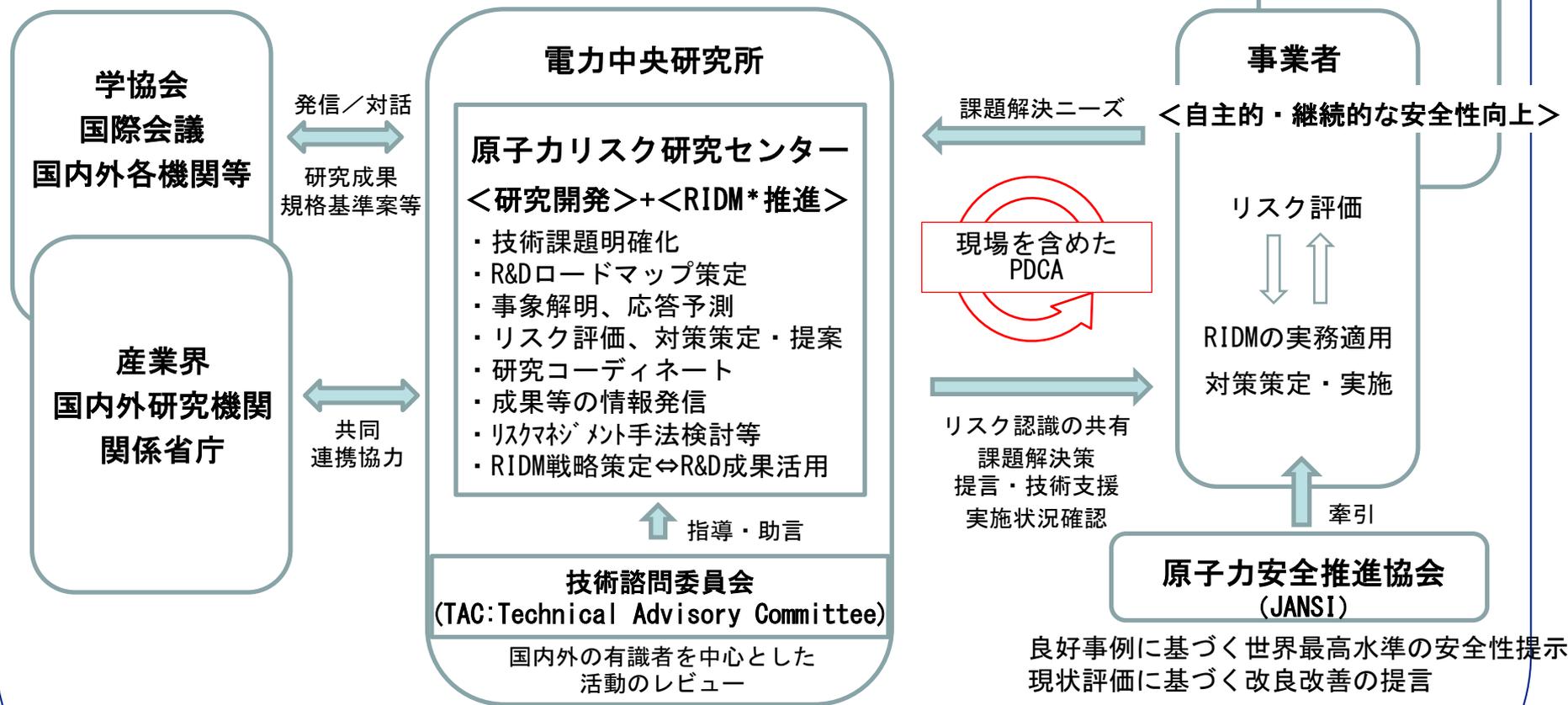
ミッション

確率論的リスク評価(PRA)、リスク情報を活用した意思決定、リスクコミュニケーションの最新手法を開発し用いることで、原子力事業者及び原子力産業界を支援し、原子力施設の安全性を向上させる。

ビジョン

PRA手法及びリスクマネジメント手法の国際的な中核的研究拠点（センター・オブ・エクセレンス）となり、それによって、あらゆる利害関係者から信頼を得る。

NRRCの位置づけ

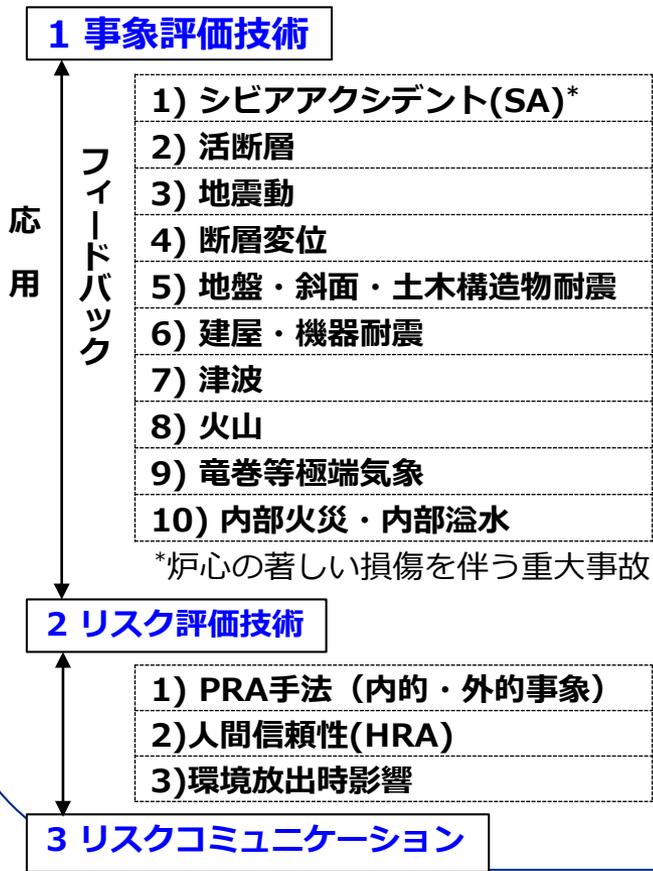


* Risk-Informed Decision Making

安全性向上を支えるリスク研究開発

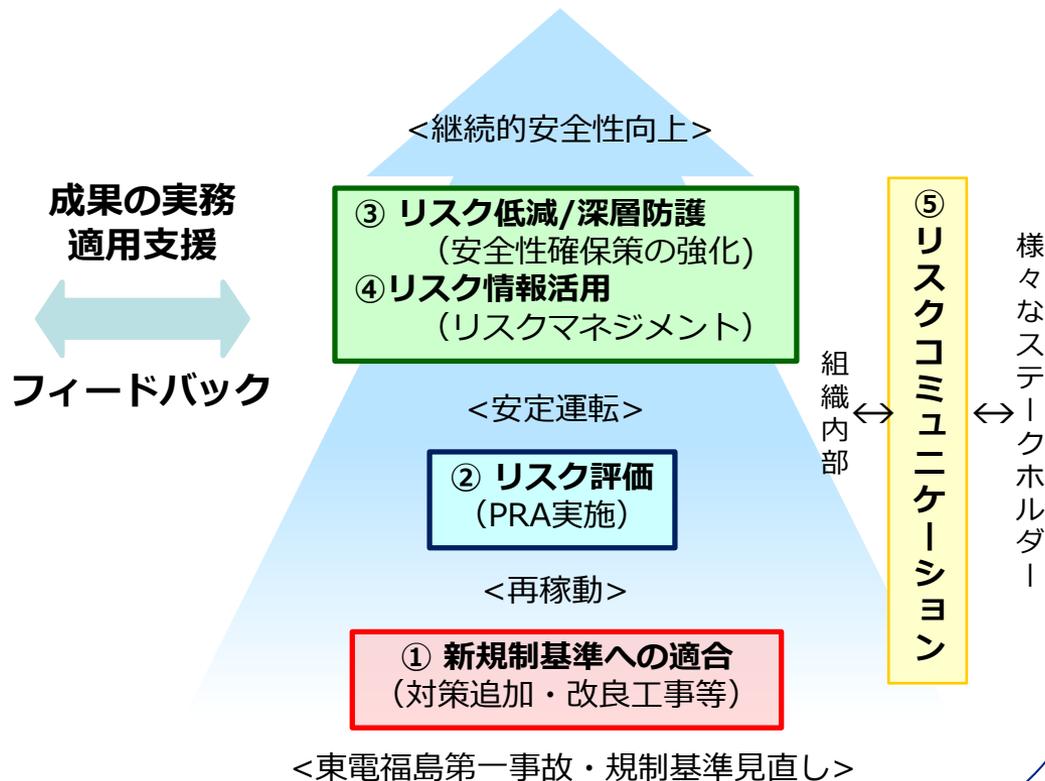
- 低頻度だが大きな被害をもたらし得る事象のさらなる解明と対策立案
- 従来の決定論的な手法に加えてリスク情報を活用する手法を適用

研究開発項目



継続的安全性向上の取り組み

*番号①～⑤は、後述のロードマップの「成果の適用先」の番号に対応



PRA技術の改良開発状況



		レベル1	レベル2	レベル3
内的事象	出力運転時PRA	2017年 内の事象HRAガイド 2018年 実施ガイド 2018年 ピアレビューガイド	2019年 過酷状況下HRAガイド 2019年 FCVSモデル高度化MAAP	2020年 早期被ばく評価ガイド
	停止時PRA			
	火災・溢水PRA	2019年 火災モデル・実施ガイド		
外的事象	地震PRA	2019年 SSHACプロセス導入 (随時) ハザード・フラジリティ評価高度化		
	津波PRA	2018年 低津波サイト評価手法 2020年 高津波サイト評価手法		
	上記以外の外部事象 (竜巻・強風、火山)			

PRA技術の改良開発スケジュール



PRA項目	研究項目	年度	2016 以前	2017	2018	2019	2020	2021 以降
出力運転時	内的レベル1PRA手法改良		研究開発	パイロット	実務適用	実務適用	実務適用	実務適用
	人間信頼性評価（HRA）手法高度化		研究開発	パイロット	実務適用	実務適用	実務適用	実務適用
	過酷状況下HRA手法開発			研究開発	研究開発	パイロット	パイロット	実務適用
	マルチユニットPRA手法開発						研究開発	パイロット
	放射性物質放出リスク評価手法高度化（レベル2）						要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用
	環境影響リスク評価手法開発（レベル3）						研究開発	パイロット
内部火災	内部火災リスク評価手法整備（レベル1）					研究開発	パイロット	実務適用
内部溢水	内部溢水リスク評価手法整備（レベル1）				研究開発	パイロット	実務適用	実務適用
地震	地震リスク評価手法高度化（レベル1-2）					研究開発	パイロット	実務適用
	SSHACプロセス確立			研究開発	パイロット	実務適用	実務適用	実務適用
	ハザード評価手法高度化					要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用
	フラジリティ評価手法高度化			要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用
津波	津波リスク評価手法高度化（レベル1-2）			研究開発	パイロット	実務適用	実務適用	実務適用
	ハザード評価手法高度化					要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用
	フラジリティ評価手法高度化					要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用
竜巻・強風	ハザード評価手法高度化、フラジリティ評価手法開発					研究開発	研究開発	研究開発
火山	ハザード評価手法高度化、フラジリティ評価手法開発					研究開発	研究開発	研究開発
リスクコミュニケーション	内部・外部コミュニケーション方法改善策策定					要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用	要素技術毎に 随時実務適用

自然事象のリスクにかかる研究開発

8. 地震/耐震【ハザード/フラジリティ】（全体概要）

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
地震ハザード評価 -活断層 -地震動	地震動評価における不確かさが大きい 日本において不確かさを、より現実的に評価する手法がない ↓ ・地震動評価の不確かさをより現実的に評価する手法を構築	【活断層】 活断層の連動性・端部の定量的な評価指標の開発	連動性評価指標提案①, ②▽	PRAのための定式化②▽	次フェーズ			
		【地震動】 震源パラメータの定量評価・地下構造モデル化手法の体系化	震源パラメータカタログの提案①, ②▽		次フェーズ			
		地震ハザード解析専門家委員会(SSHAC)技術支援			次フェーズ			
		SSHACプロセス国内適用（課題抽出など）②▽ 確率論的地震ハザード評価の高度化						
地震PRAプロジェクト					計画中			
地震フラジリティ評価 -機器 -建物 -地盤・斜面 -地中土木構造物	耐力とフラジリティの評価が保守的な評価に留まっている ↓ ・フラジリティを、より現実的に評価する手法を構築	【機器】 機器配管系の弾塑性評価法の構築	弾塑性解析法提案①, ②▽					
		【機器】 地震損傷データに基づく現実的フラジリティ評価手法構築	地震損傷データに基づくフラジリティ評価法構築①, ②▽	配管系簡易弾塑性解析法提案①, ②△				
		【建物】 大入力に対する建屋挙動評価(3次元モデル・地盤-建屋相互作用など)	大入力時の建屋挙動評価手法提案①, ②▽		次フェーズ			
		【地盤・斜面】 地盤・斜面の2次元, 3次元非線形解析手法の開発	基礎地盤への実用化（2次元）①, ②▽	▽実岩盤への実用化（2次元）①, ②				
		【地中土木構造物】 地中土木構造物の耐震性能照査手法の標準化/高度化/実用化	等価線形解析実用化（3次元）①, ②△	三次元地震応答解析手法実用化①, ②▽	▽終局耐震性検討手法構築①, ②			

8-1. 地震/耐震【地震ハザード（活断層）】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

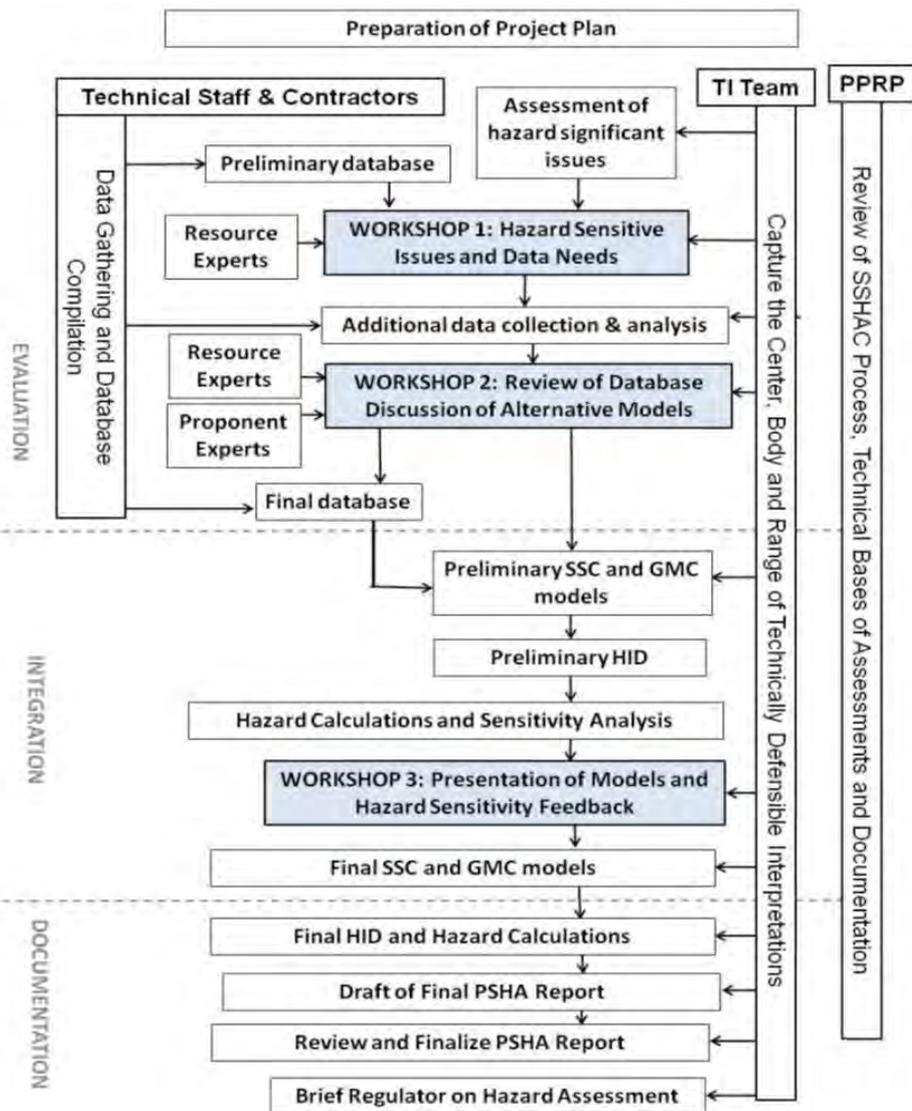
項目	ギャップ/解決方策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
活断層の震源断層評価	<p>地震規模評価において、活断層の連動区間・端部に関する評価基準に関する知見の補強が必要。また、活構造の認定において、地域性の不確かさが大。</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実地震の破壊停止要因に基づく連動性評価指標の提示 ・活断層が認めにくい要因の分析とそれに応じた認定手法の蓄積 		<p>連動性・端部の定量的な評価指標の開発</p> <p>知見反映</p>	<p>連動性評価指標提案①, ②▽</p> <p>火山地域の認定手法提案①▽</p>	<p>次フェーズ：新たな指標を踏まえたセグメンテーション評価手法の開発</p> <p>PRAのための定式化②▽</p>			
			<p>震源を特定しにくい地域における活構造認定手法の開発</p> <p>知見反映</p>	<p>地域性を考慮した震源断層評価手法の構築</p> <p>活断層の未成熟な地域の認定手法提案①▽</p>				
近年発生した地震を対象にした断層調査	<p>活断層が未確認の地域における地表地震断層の出現事例の増加。</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・当該断層の破碎性状や活動性の調査に基づき、事前に評価しうる可能性を明確化 		<p>活断層として認識されていなかった地表地震断層の調査</p> <p>破碎性状・活動性</p>		<p>事前評価の可能性に関する検討</p> <p>知見反映</p>			
				<p>地表地震断層の特性提示①△</p>				

8-2. 地震/耐震【地震ハザード（地震動）】

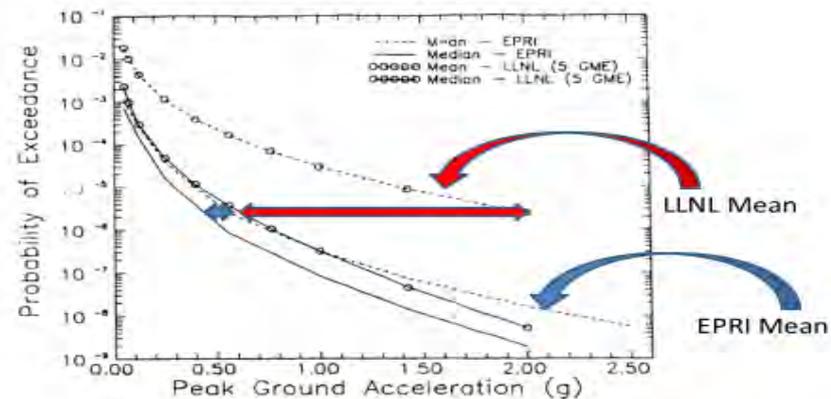
▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決方策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
震源を特定して策定する地震動の評価	既往被害地震の震源モデルが質・量とも少ない、地下深部の速度構造モデル化手法の高度化が必要 ↓ ・統一した手法を用いた震源モデル化 ・観測データに基づく地下構造評価法の確立			近年の被害地震、計器観測初期の地震の震源パラメータカタログ提案①② ▽			震源近傍記録の共通事項、サイト固有事項の解明と新知見創出① ▽	
		インバージョン手法による震源パラメータの定量評価		地下構造モデル化の体系化① ▽	地震観測・微動観測に基づく地下構造把握・モデル化手法の体系化	次フェーズ：震源近傍強震動と深部地盤構造の評価		
震源を特定せず策定する地震動の評価	M6級の中規模地震の際に震源近傍で稀に得られる大加速度記録の発生要因に関する知見の補強が必要 ↓ ・強震記録の取得地点での詳細調査に基づく発生要因の解明 ・地盤増幅の影響を除去した基盤地震動の評価			震源を特定せず策定する地震動に資する地震動評価① ▽			非線形サイト特性・地形サイト特性・3次元サイト特性モデル構築①②▽	
		防災科学技術研究所の強震観測点における大加速度観測記録の ①地下構造調査による発生要因解明と基盤地震動推定 ②鉛直アレイ地震観測の実施による検証（同研究所との共同研究）			次フェーズ：サイト特性予測モデルの構築とGMPEへの取り込み			サイト特性モデル構築への反映
確率論的地震ハザード評価	SSHACの国内適用方法が未確立 ↓ ・確率論的地震ハザード評価における認識論的不確実さ考慮を目的としたSSHACレベル3手法の国内適用方法確立 ・確率論的地震ハザード解析で用いる要素技術の高度化			プロジェクト報告書作成支援② ▽ 伊方SSHACプロジェクトの技術支援			ばらつき評価への反映	
		△プロジェクトプラン作成② ▽SSHAC Level 3に基づく確率論的地震ハザード解析の課題抽出② ▽	確率論的地震ハザード解析高度化のための要素技術の高度化	次フェーズ：全社展開/地震・津波重畳等のマルチハザード評価	SSHACプロセス国内適用② ▽地震予測モデルの定量的選択方法高度化② IAEA TECDOC：確率論的地震ハザード解析の検証・更新方法開発	▽断層モデルも考慮した確率論的地震ハザード解析手法開発②		

SSHACの意義、概要



- SSHAC(NUREG-2117): Practical Implementation Guideline for seismic hazard assessment.
- No experience with SSHAC applications in Japan.
- Guarantees the objectivity and transparency.
- NRRC is collaborating with electric utilities.



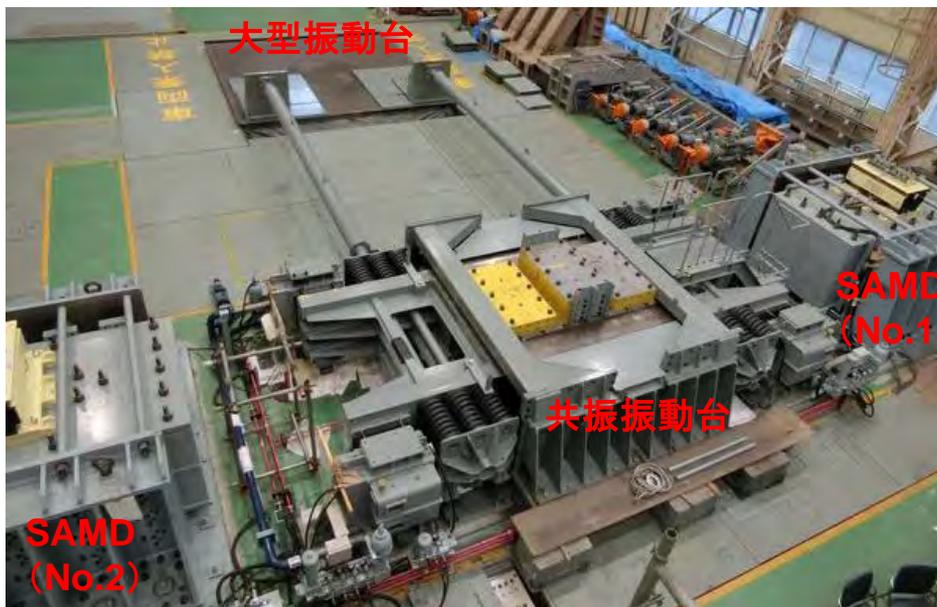
Very different results, in terms of mean hazard and associated uncertainty, from the two studies for a single NPP site

8-3. 地震/耐震【地震フラジリティ（機器）】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
機器・配管の加振試験	大加速度時の破壊挙動や機能維持に関する知見の補強が必要 ↓ ・20Gまでの加振による限界耐力・機能維持限界の把握							
		弁の加振試験・機能維持限界評価 機能維持確認済加速度確認①, ②▽ ▽動的機器の現実的機能維持限界評価法構築①, ②						
機器・配管の現実的耐力・応答評価	耐力とフラジリティの評価が保守的な評価に留まっている 可搬機器等のフラジリティの評価等の整備が必要 ↓ ・従来の弾性範囲の評価を置き換える塑性変形能力・疲労・弾塑性応答を考慮した現実的な評価法を整備 ・可搬機器等のフラジリティ評価法等を整備							
		加振試験による機器・配管系（配管サポート等）の限界耐力評価 ・機器・配管系（配管サポート等）の弾塑性評価法の整備 ・配管系簡易弾塑性評価法の構築 ▽配管系簡易弾塑性評価法構築①, ②						
		知見反映 多方向入力時の疲労損傷評価法提案①, ② ▽ 損傷モードに応じた許容値・地震動指標・累積疲労評価法の整備 ▽弾塑性応答評価の許容基準値提案①, ②						
		知見反映 新規制基準を踏まえた機器・配管系評価法の整備 ▽現実的な機器・配管系の耐震評価法構築① 高度化された係数評価法、可搬設備等のフラジリティ評価法構築①, ②▽ ・安全係数法に基づく機器フラジリティ評価手法の高度化 ・可搬設備等のフラジリティ評価手法構築 ・地震損傷データに基づく現実的フラジリティ評価手法構築 地震損傷データに基づく現実的フラジリティ評価法構築①, ② △						

共振振動台の概要



共振振動台の基本性能

	共振振動台	従来設備※
最大加速度	20G	10G
搭載重量	10t	10t
テーブルサイズ	2×2m	2×2m
加振周波数	10Hz	10Hz

- ・導入計画は、311以前から進めていた。
- ・311を契機に、開発と導入を加速した。

導入の経緯

- ・2011 概念設計開始
- ・2013.7 本体完成
(振動対策工事)
- ・2014.12 工事完了
- ・2015.2 運用開始

※スペックは概略値

共振振動台による重要機器の加振試験

【背景・目的】

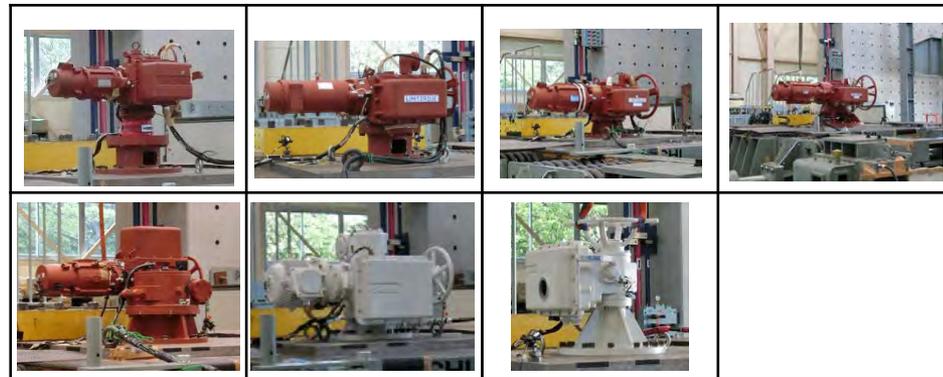
基準地震動の増大により原子力機器の耐震余裕が小さくなっている。このため、最大加速度20Gの共振振動台を導入し、機能確認試験を行う。

【実施内容】

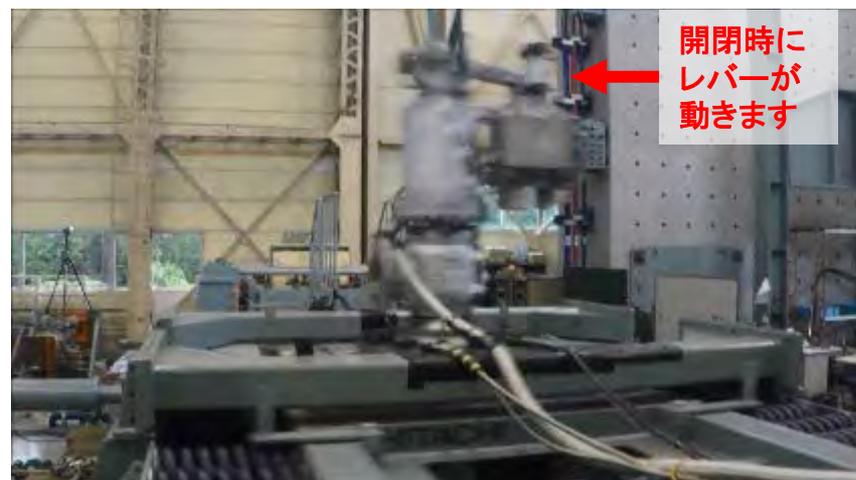
耐震評価上重要機器である、主蒸気逃がし安全弁・電動弁について、実物の模型を共振振動台に据え付け、最大加速度20Gの加振試験を行う。加振中に弁の開閉操作を行い、機能を確認する。

【主な成果】

主蒸気逃がし安全弁および電動弁は、最大加速度20Gでの動作機能が確認された。この成果は、耐震規程JEAC4601の動作機能確認済加速度に反映される。



電動弁駆動部(7種類)の加振試験



主蒸気逃がし安全弁加振試験ビデオ

8-4. 地震/耐震【地震フラジリティ（建屋）】

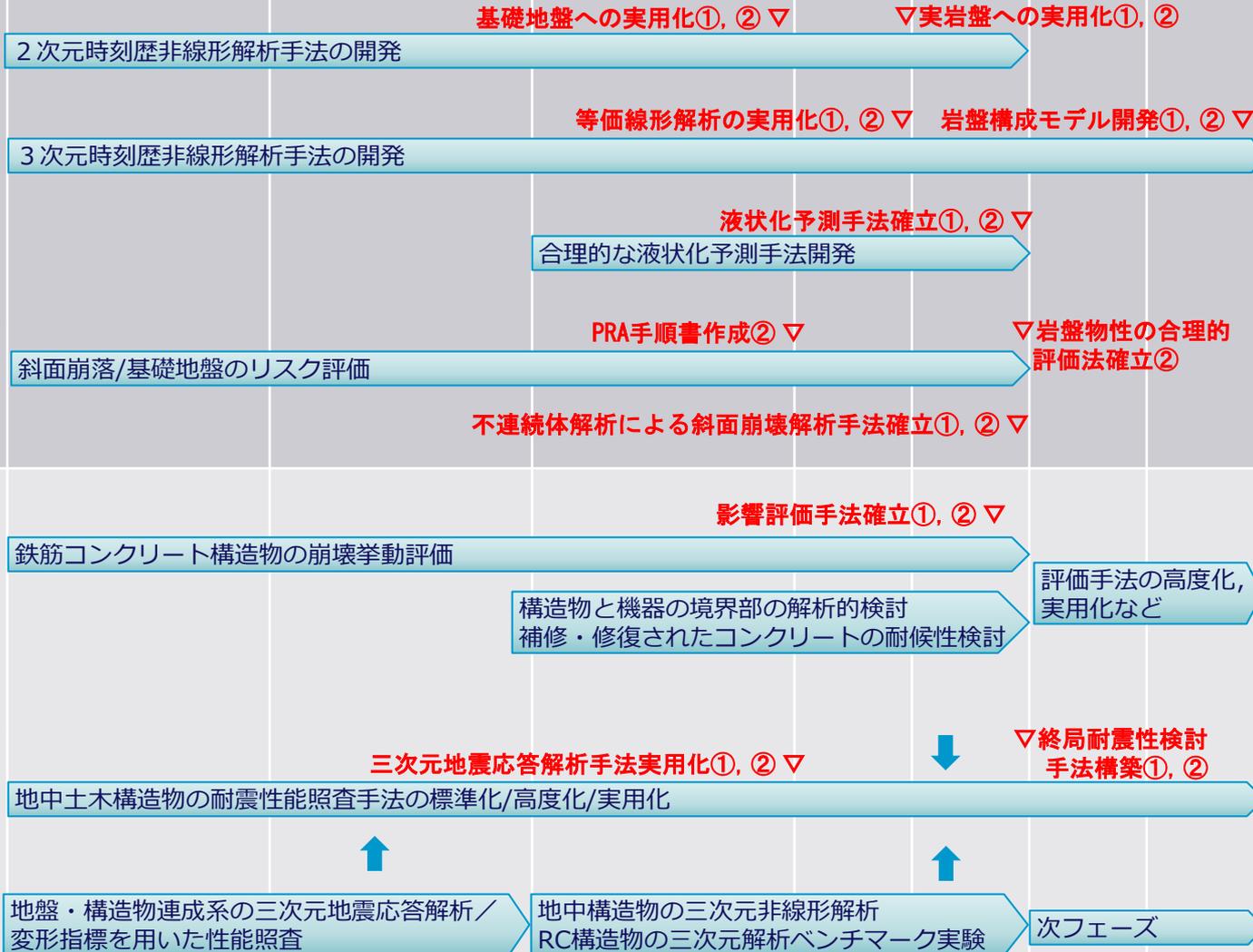
▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
合理的な耐震設計手法及び耐震安全性評価手法	大入力に対する建屋の3次元挙動に関する知見の補強が必要 RC部材の地震経験依存性に関する知見の補強が必要 ↓ ・建屋3次元FEM解析による建屋挙動に関する知見の蓄積 ・建屋の3次元振動特性評価法の提案 ・地震後剛性低下を考慮した地震荷重評価法の整備								
		大入力に対する建屋挙動評価（3次元モデル・地盤-建屋相互作用など）						次フェーズ：耐震安全性評価高度化研究	
		実建屋の地震観測による3次元振動特性同定法開発				知見反映		△大入力時の建屋挙動評価法、影響評価法の提案①、② △3次元耐震性能評価法の提案①、②	
		地震経験を考慮した地震荷重評価法の開発				知見反映		地震後剛性低下を考慮したRC部材の地震荷重評価法整備①、②▽	
免震構造の極限荷重設計法	免震建屋の耐震設計限界が線形までとなっている ↓ ・線形限界を超える免震建屋の応答評価法の提案								
		現行設計限界を超える免震応答評価法①、②▽						次フェーズ：免震建屋フラジリティ評価手法開発	
		RC部材の高加速度試験法の整備①、②△							

8-5. 地震/耐震【地震フラジリティ（地盤、斜面、土木構造物）】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

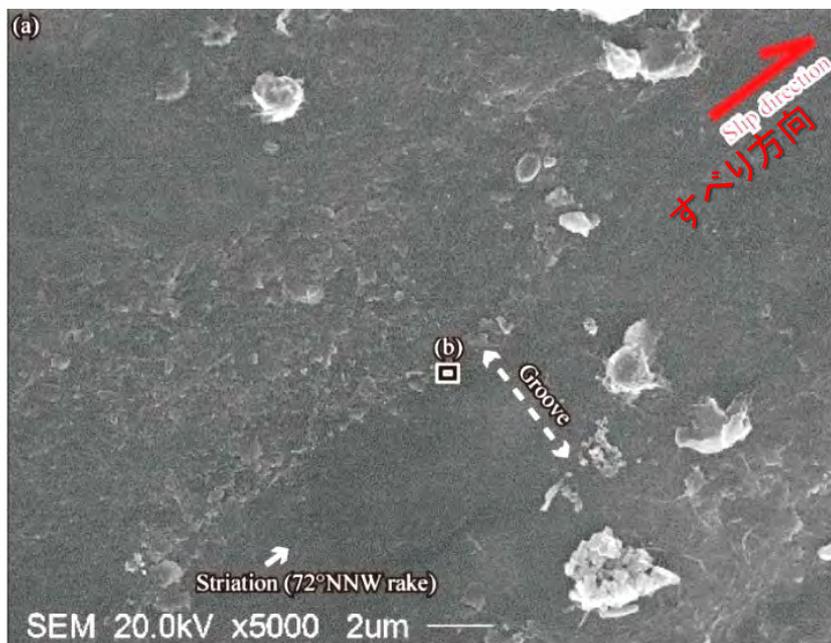
項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
地盤・斜面評価	基準地震動の増大に伴って、二次元等価線形に基づく照査及びリスク評価、液状化評価では厳しい場合があるため、より現実的な解析手法の開発と合理的なリスク評価の導入が必要 ↓ ・2D及び3D時刻歴非線形解析の実用化 ・非線形解析及び不連続体解析を用いたリスク評価手法の確立 ・合理的な液状化予測手法の開発								
		2次元時刻歴非線形解析手法の開発			基礎地盤への実用化①, ② ▽		▽実岩盤への実用化①, ②		
		3次元時刻歴非線形解析手法の開発							
		斜面崩落/基礎地盤のリスク評価							
土木構造物評価	基準地震動の増大に伴って、二次元解析による安全側の照査では厳しい場合があるため、より現実的な解析手法や合理的な照査指標の導入が必要 ↓ ・地盤構造物連成系の三次元非線形解析および変形・ひずみに基づく性能照査手法を構築 ・詳細な崩壊機構、機器境界部、補修効果が耐震性に及ぼす影響評価方法の提案								
		鉄筋コンクリート構造物の崩壊挙動評価							
		地中土木構造物の耐震性能照査手法の標準化/高度化/実用化							
		地盤・構造物連成系の三次元地震応答解析/変形指標を用いた性能照査							



断層活動性評価の最新成果例 —電子顕微鏡による破砕帯の観察—

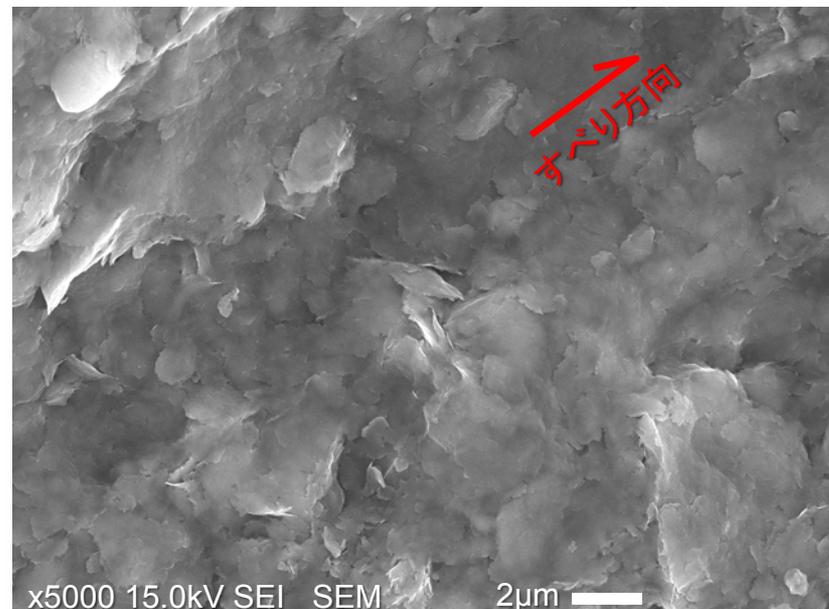
- 目的: 評価基準となる上載層がない場合に適用可能な, 断層破砕性状に基づく活動性評価手法を構築する。
- 成果: 上載層の変位状況から活動性が認定できる活断層と非活断層を対象にして, 破砕帯の性状を比較した。SEM(走査型電子顕微鏡)による断層面上の条線観察から, 両者に明瞭な差異が認められた。

活断層 (茨城県北部)



ナノサイズの細粒粒子が分布

非活断層 (福岡県)



板状の粘土鉱物(スメクタイト)が発達

破砕性状による断層活動性の指標に

9-2. 敷地直下断層評価【断層変位評価】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
断層変位評価	不確かさの幅が広い断層変位量の予測手法が未確立。実際のデータも少数。 ↓ ・衛星画像データを活用によるDBの拡充 ・数値解析手法の確立	動力学的モデル/HPCによる断層変位評価の構築 ↑ 入力条件			変位と地震動の重畳の検討		▽地震動との重畳を考慮した評価手法構築①, ②	
		主断層/副断層の認定手法開発						
		衛星画像解析に基づく地表地震断層の定量評価（DB拡充）			▽断層変位ハザード評価手法構築②			
		確率論的断層変位ハザード評価の高度化 ↓ 経験式の改良						
断層変位に対する設計を行ううえで、変位に対する構造物の許容値等を含む設計基準自体が未整備	↓ ・実験及び数値解析により、変位応答評価手法、許容値を含む設計基準を策定		断層変位評価手法提案①, ②▽				▽地震動との重畳を考慮した評価手法提案①, ②	
		屋外重要土木構造物の断層変位に対する評価手法の確立						
断層変位に対する設計を行ううえで、断層変位に対するPRA評価手法自体が未整備	↓ ・フラジリティ評価手法の確立、事故シーケンス評価を実施し、PRA手法を確立		断層変位に対する損傷評価手法提案①, ②▽ 地震動との重畳を考慮した解析手法提案①, ②▽				▽地震動との重畳を考慮したPRA手法構築②	
		原子炉建屋の断層変位に対する評価手法の確立						
定量的なリスク評価を行ううえで、断層変位に対するPRA評価手法自体が未整備	↓ ・フラジリティ評価手法の確立、事故シーケンス評価を実施し、PRA手法を確立		断層変位に対するPRA手法提案②▽				▽地震動との重畳を考慮したPRA手法構築②	
		建屋・構造物や機器・配管系の断層変位に対するフラジリティ評価手法、断層変位に対する事故シナリオ検討による、PRA手法構築						

10. 津波【ハザード/フラジリティ】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
津波ハザード評価	<p>古津波による、信頼できる被害津波記録は少なく、津波規模推定の不確実性大。非地震性津波評価手法に関する知見の補強が必要</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質学的調査で古津波の知見を増やし、不確実性の定量化精度向上 数値解析手法や確率論的評価手法の確立により非地震性津波のリスク評価法確立 		<p>現地採取堆積物分析、堆積物生成過程模擬実験、評価手順確立</p>			<p>▽堆積物分析に基づく津波規模評価手法確立①,②</p>		
			<p>陸上及び海底の地すべり・火山現象等に起因する津波の評価手法の構築(数値解析手法)</p>					
				<p>非地震性波源の考慮による確率論的津波ハザード評価手法の拡張</p>		<p>▽地震性と非地震性の波源を考慮した確率論的津波評価手法提案②</p>		
津波PRAプロジェクト			<p>概略評価</p>			<p>詳細評価</p>		<p>▽国内適用③,④</p>
津波フラジリティ・耐力評価	<p>様々な津波影響を考慮した津波PRAの手法および手順に関する知見の補強必要</p> <p>また、津波影響評価技術に関する新知見の検証が必要</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> 津波PRAにおけるフラジリティ評価の試行を通して、評価手法および手順を提案 新知見を収集すると共に、それを踏まえた津波影響評価手法の検証および高度化 			<p>津波PRAにおけるハザード評価～フラジリティ評価の試行</p>		<p>▽低ハザードサイトの津波フラジリティ評価手法提案②</p>		
				<p>△ハザードレベルに応じたスクリーニング概念提案②</p>				<p>△高ハザードサイトの津波フラジリティ評価手法提案②</p>
			<p>▽波圧評価手法整備①,②</p>		<p>▽配管・機器の対津波設計手法整備①,②</p>		<p>▽溢水評価手法整備①,②</p>	
				<p>津波影響評価手法の高度化(溢水/津波荷重/漂流物影響/浮遊砂影響)</p>				
				<p>△漂流物影響評価手法提案①,②</p>				<p>△浮遊砂影響評価手法整備①,②</p>

津波・氾濫流水路(2014年導入)

ヘッドタンク
(650 トン)

制御ユニット

試験水路
高さ2.5m,幅4.0m,長さ20m

地下水槽

バルブ

ゲート

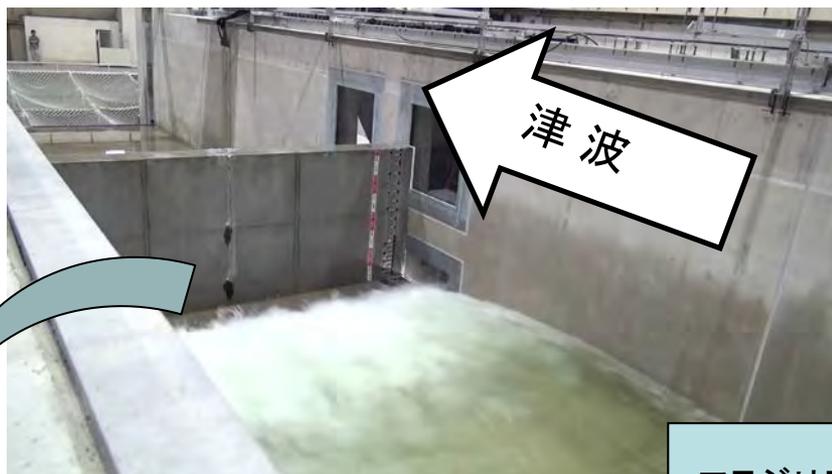
可動堰



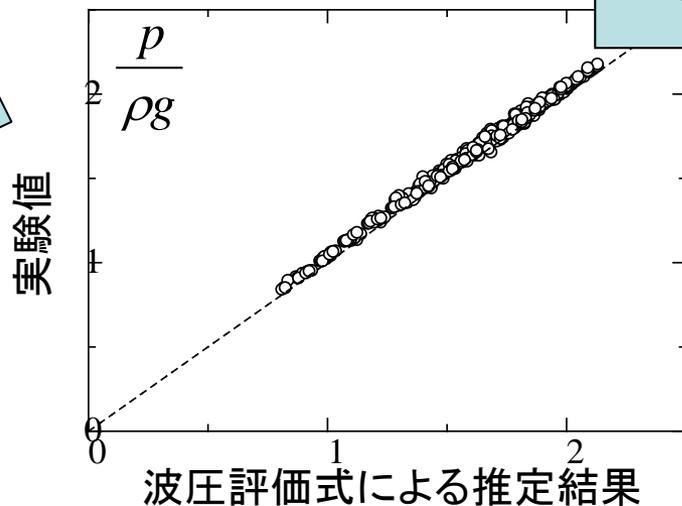
- バルブ・ゲート・可動堰の連動制御により、試験水路内で任意の流れを作成可能(最大流速7m/s, 最大流量10t/s)

津波波力に対する防潮堤のフラジリティ評価

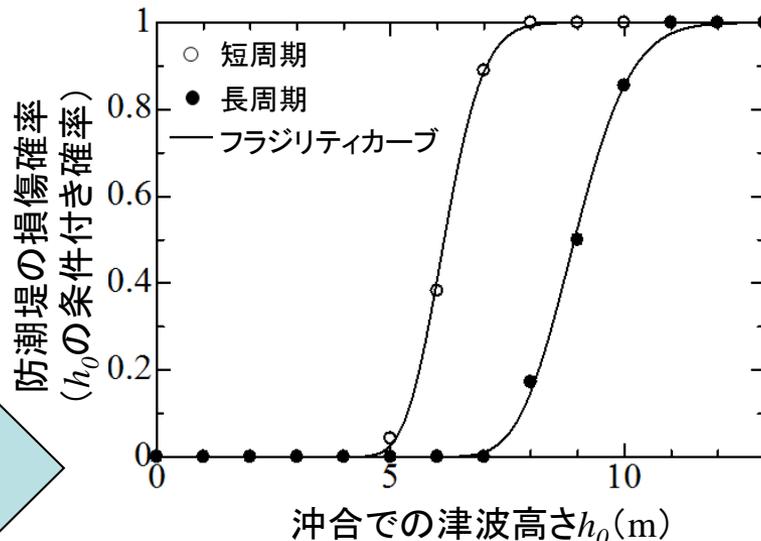
鉄筋コンクリート製防潮堤に作用する
津波波力に関する水理実験※1



実験結果を用いた波圧評価式の精度検証



津波波力に対する鉄筋コンクリート製
防潮堤(仮想)のフラジリティ※2



大規模水理実験から得た波圧評価式の精度に関する不確かさに加え、

- ✓ 津波高さの推定精度
 - ✓ 浮遊砂濃度
 - ✓ コンクリート・鉄筋の強度
 - ✓ せん断耐力評価式の精度
- に関する不確かさを考慮

※1 ... Kihara et al Coastal Engineering, 2015

※2 ... Kaida, Miyagawa and Kihara, ICONE24, 2015

11. 竜巻等極端気象【ハザード/フラジリティ】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
極端気象ハザード評価、飛来物影響評価	地形が竜巻に与える影響、竜巻の地域特性、飛来物衝突確率、台風ハザードに関する合理的な評価方法に関する知見の補強が必要 ↓ ・日本の地形条件、気象条件を適切に考慮できる合理的な設計竜巻評価法の開発 ・日本の発電所に適した確率論的竜巻飛来物影響評価モデルの確立 ・台風影響評価法の開発		ハザード評価モデルTOWLAの改良 飛来物速度評価コードTONBOSの改良					
		確率論的飛来物評価法の構築とその数値解析コードTOMAXIの開発	台風影響評価法の開発					
竜巻等極端気象に対する対策工評価と固縛対策支援技術	竜巻飛来物のリスクを定量化する方法が整備されておらず、過剰な対策を避けるための合理的な対策設計法が必要 ↓ ・フラジリティ評価に基づく合理的な対策工評価の提案 ・竜巻の検知・予測など、ソフト的な固縛対策支援策の開発							
		飛来物対策工評価に関するバックデータ蓄積/数値解析手法の確立 構造物健全性評価に関する数値解析手法の確立	リアルタイム竜巻検知・予測システムの構築					

▽日本の諸条件に適合する竜巻影響評価法確立①, ②

▽確率論的飛来物影響評価手法確立②

台風影響評価法確立①, ②▽

既開発のハザード評価ツールをベースとした強風リスク評価法の開発

▽竜巻飛来物に対する合理的な対策工や評価法確立①

▽固縛対策支援策確立①

損傷リスク情報に基づく対策設計手法の開発

高強度金網を用いた飛来物対策

高強度金網試験体

金網種別: ひし形金網

金網寸法: 展開4m × 幅3m (1枚)
 展開3m × 幅4m (1枚)

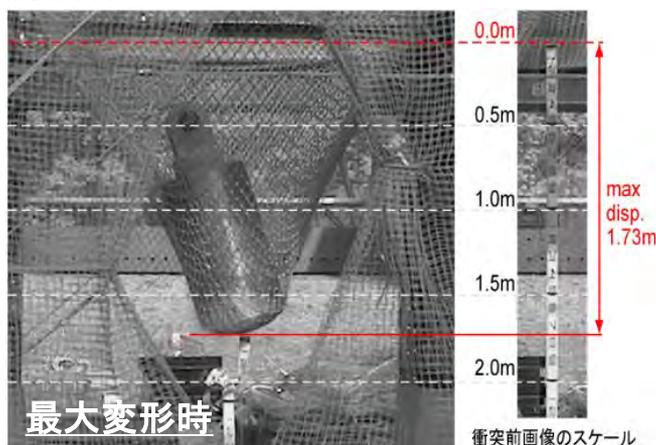
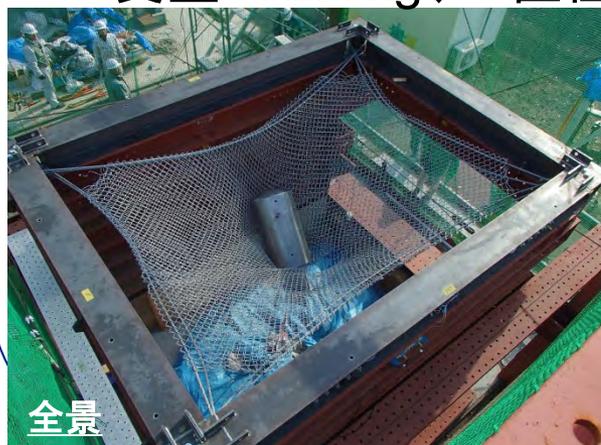
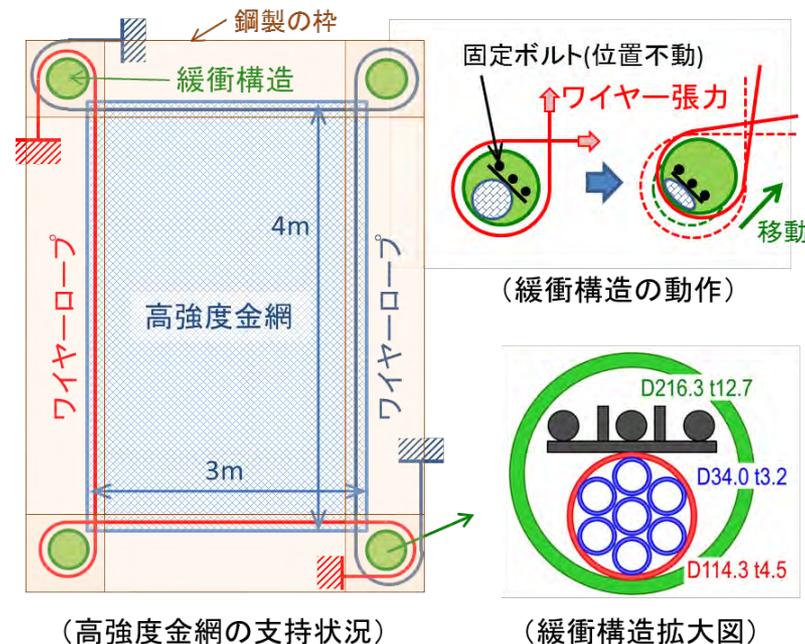
素線径: 4mm、素線強度: 1400N/mm²

材質: 亜鉛メッキ鋼線

緩衝構造: ワイヤークラッチを低減

重錘

質量: 1500kg、 直径: 0.5m



12. 火山【ハザード/フラジリティ】

▽：R&D成果（①-⑤：成果の適用先）

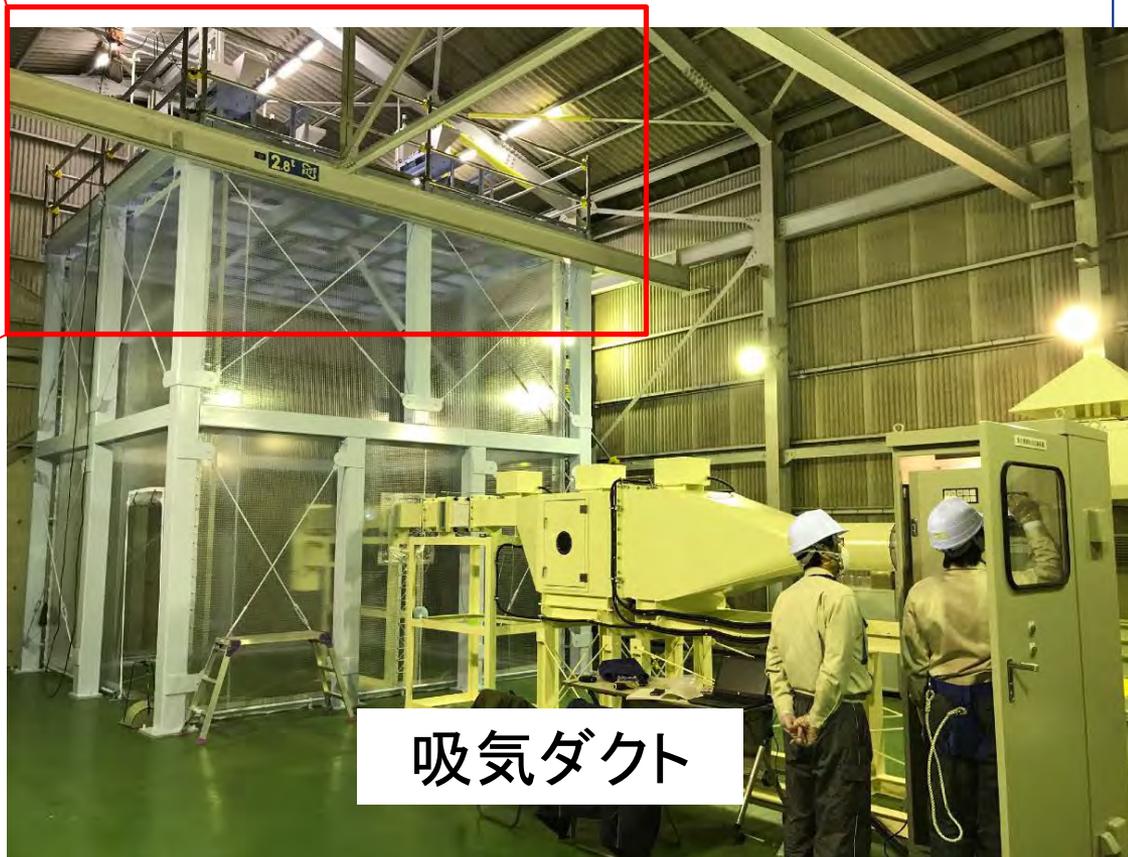
項目	ギャップ/解決策	～2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
火山灰 ハザード評価	<p>降灰荷重ハザードについて、既存の評価は決定論（既往最大値の参照）に留まる。機器脆弱性評価と関連が深い噴煙・降灰の数値解析では、適切な初期条件の設定が分野全体の本質的な課題であり続けている。</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> 降灰履歴に基づくハザード曲線を新たに策定 噴煙・降灰の数値解析について、適切な初期条件の決定手法を開発 	<p>ハザード曲線</p>	<p>降灰量・年代等のデータの拡充</p>	<p>マグマ特性と降灰の特性を関連づけるモデル構築、検証</p>	<p>▽文献ベースのハザード曲線提案②</p>	<p>▽噴煙規模/マグマ特性/降下火山灰評価式構築①, ②</p>	<p>▽降下火山灰ハザード評価モデル確立①, ②</p>	<p>▽ハザード曲線改良②</p>
		<p>代表的気象条件の選定</p>	<p>噴煙高度の設定手法開発（噴煙柱モデルと噴煙/降灰モデルとの融合）</p>	<p>ハザード曲線の改善</p>	<p>大規模噴火の噴煙・降灰挙動の解明</p>			
火山灰 に対する 脆弱性評価	<p>火山灰に対する機器脆弱性について、定量データが不足。効率的な対策の選択肢も乏しい。</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> 火山灰に対する機器脆弱性試験を実施 数値解析手法を開発 効率的なプレフィルタを提案 			<p>▽効率的なプレフィルタ提案①</p>	<p>▽侵入する粒子量に対する粒径の影響評価（ディーゼル発電機吸気口を模擬した試験）</p>	<p>▽プレフィルタ改良①</p>	<p>フィルタシステム（プレフィルタ等）の改良</p>	<p>▽数値解析手法提案①</p>
			<p>効率的なプレフィルタの開発</p>	<p>機器周辺の気流の数値解析手法</p>	<p>粒子を含める</p>	<p>形状効果</p>		

降灰環境吸気試験設備

降灰装置



降灰チャンバ



吸気ダクト

安全性向上を支えるリスク研究開発

- 低頻度だが大きな被害をもたらし得る事象のさらなる解明と対策立案
- 従来の決定論的な手法に加えてリスク情報を活用する手法を適用

研究開発項目

1 事象評価技術

- | |
|-------------------|
| 1) シビアアクシデント(SA)* |
| 2) 活断層 |
| 3) 地震動 |
| 4) 断層変位 |
| 5) 地盤・斜面・土木構造物耐震 |
| 6) 建屋・機器耐震 |
| 7) 津波 |
| 8) 火山 |
| 9) 竜巻等極端気象 |
| 10) 内部火災・内部溢水 |

*炉心の著しい損傷を伴う重大事故

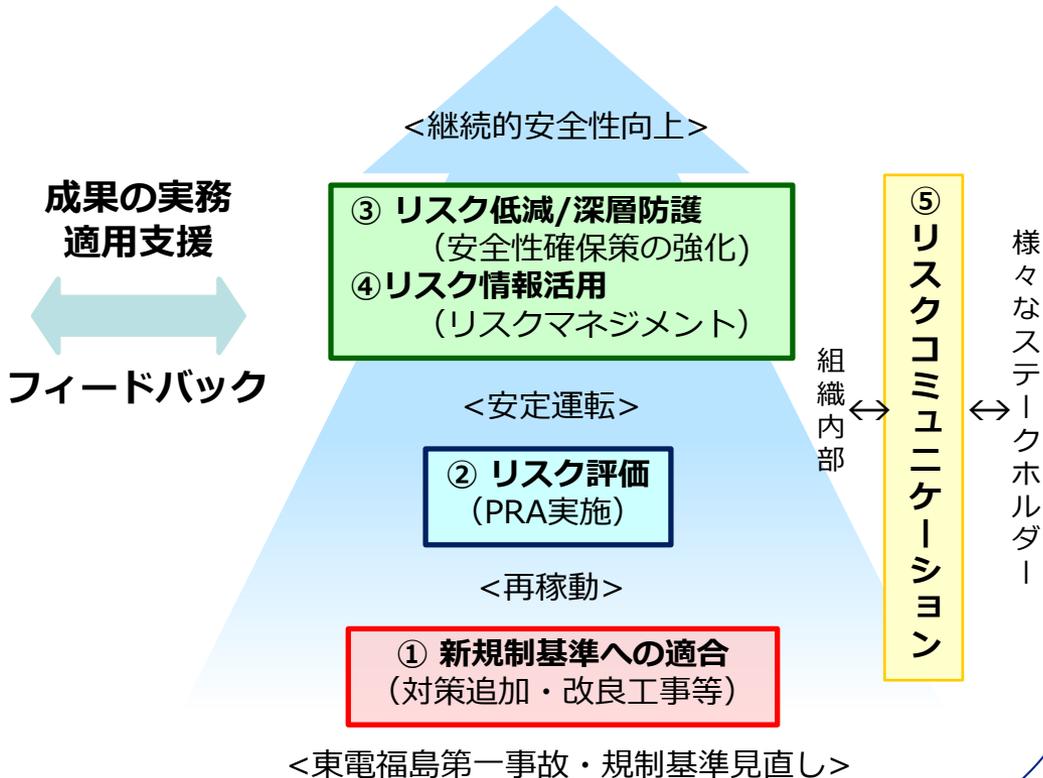
2 リスク評価技術

- | |
|--------------------|
| 1) PRA手法 (内的・外的事象) |
| 2) 人間信頼性(HRA) |
| 3) 環境放出時影響 |

3 リスクコミュニケーション

継続的安全性向上の取り組み

*番号①～⑤は、後述のロードマップの「成果の適用先」の番号に対応



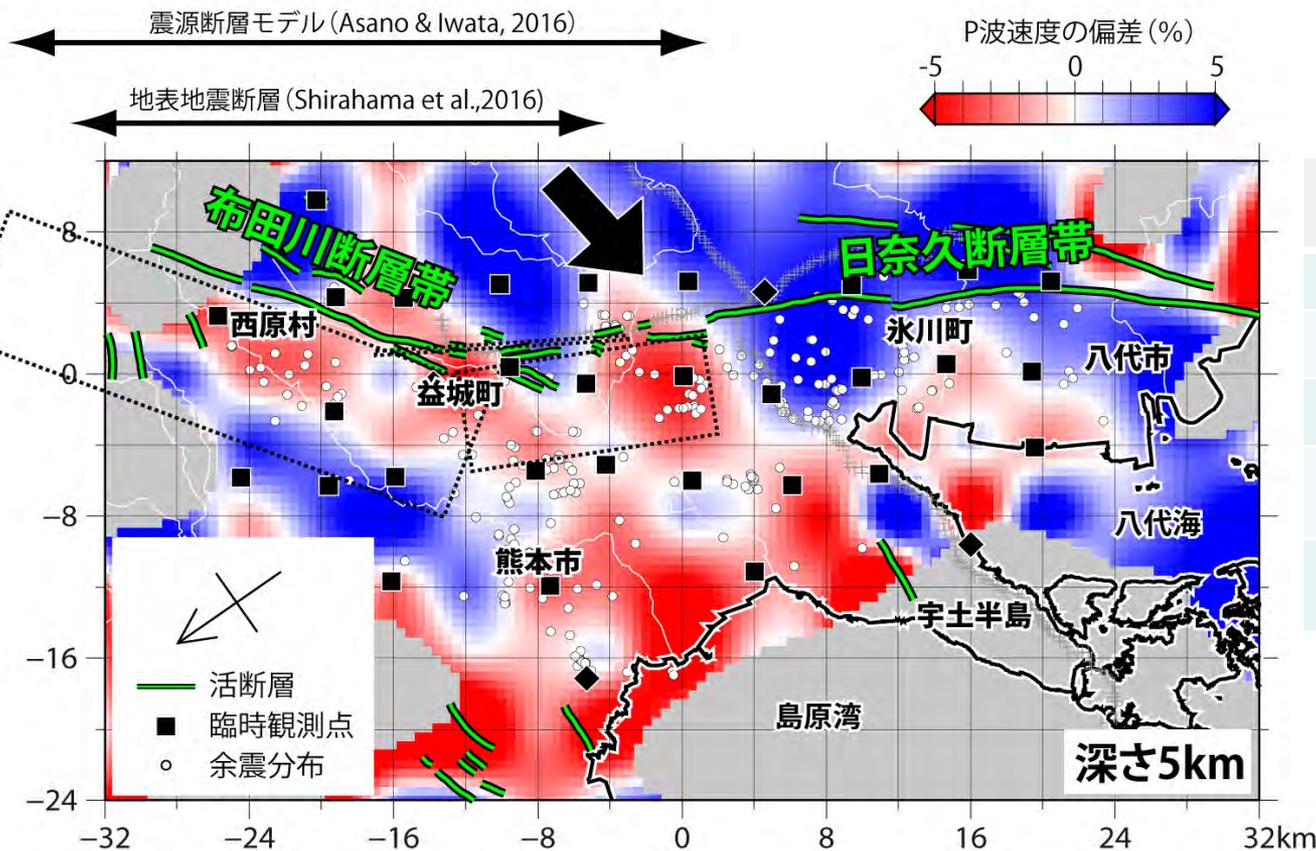
ご清聴ありがとうございました

以下 手持ち

活断層研究の最新成果例 ー断層の破壊を停止させる要因の検討ー

- 目的: 長大活断層の一部を破壊した地震の停止要因を解明し、連動性評価のための定量的な指標を見出す。
- 成果: 2016年熊本地震の余震観測データを用いたトモグラフィ解析により、震源域の地震波速度構造を推定した。破壊伝播域と停止域では、物性的な違いが認められた。今後、活断層の連動性指標として定量化する。

2016年熊本地震の破壊域



代表地点での速度値(深さ12.5km)

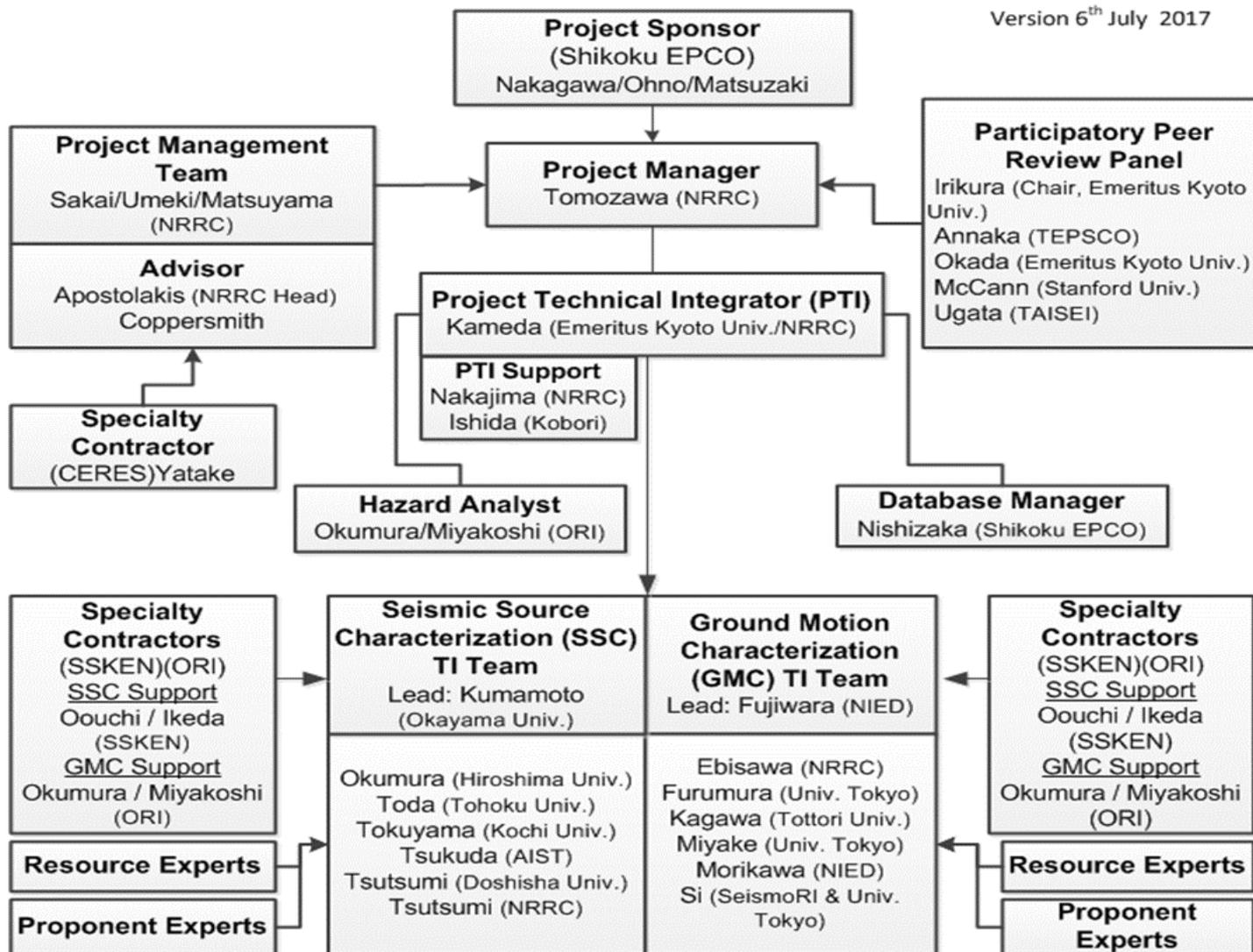
	破壊伝播域	破壊停止域
Vp(km/s)	6.267	6.53
Vs(km/s)	3.762	3.662
Vp/Vs	1.666	1.783
ポアソン比 σ	0.218	0.271
推定される構成岩石	花崗岩	苦鉄質岩

↓
定量的な連動性指標に

稠密余震観測に基づく地震波トモグラフィ解析結果 (青柳・木村, 2016活断層学会)

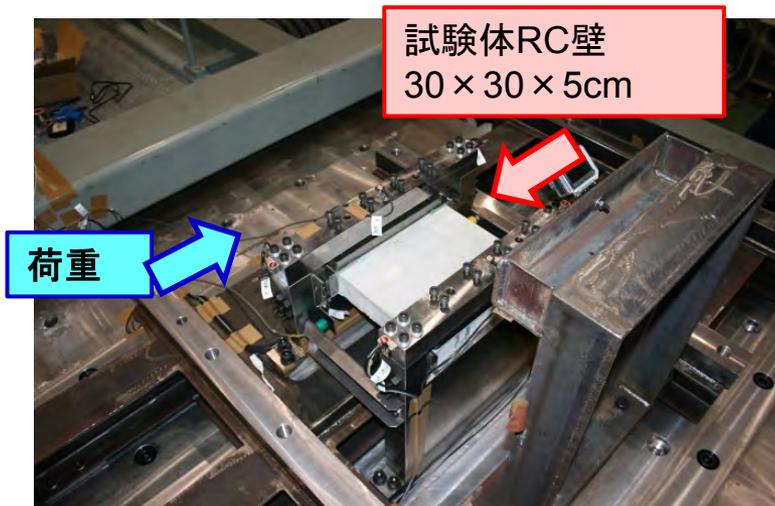
伊方 SSHAC プロジェクト(2016.3-2019.3(予定))

Version 6th July 2017



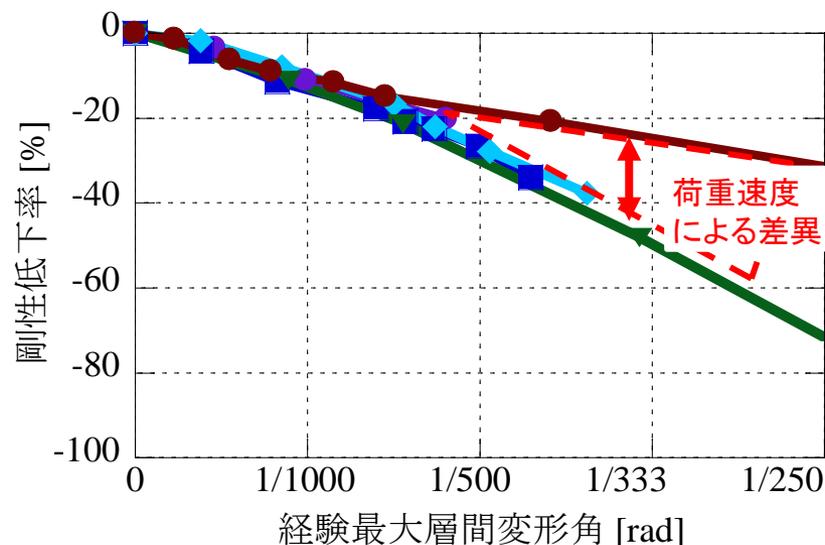
(1) 建屋の地震荷重評価～地震経験による影響評価～

- 女川原子力等で観測された地震経験後の剛性低下現象の解明
 - 高加速度実験法を構築して、共振振動台等による検証実験を実施
 - 加速度性能10Gの性能を確認
 - 高加速度影響の実証データの取得



共振振動台上に慣性マスによる動的載荷システムを構築

鉄筋コンクリートの破壊過程を動的に評価する



地震荷重による鉄筋コンクリート壁の剛性低下現象を再現

載荷速度によって剛性低下の傾向が異なる

(2) 建屋の免震フラジリティ評価

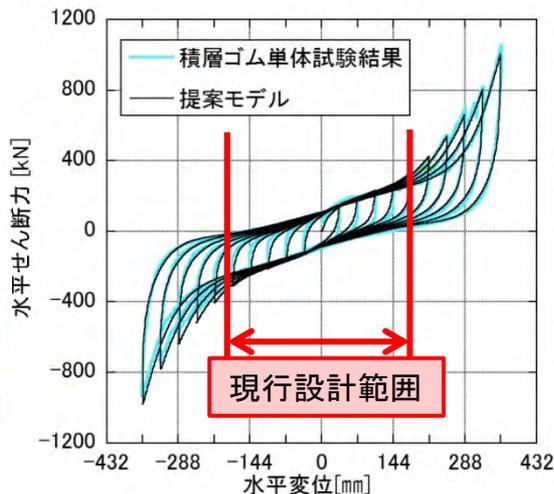
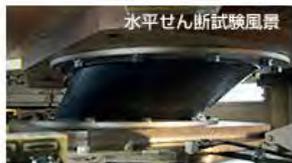
- 地震荷重が大きくなり使いにくくなった免震を復活させる試み
 - 水平復元力について, 設計範囲を超える領域の免震力学モデルを構築
 - 論文発表: 建築学会構造系論文集

「免震構造システムの力学的エネルギー評価に適した地震応答解析」, 第733号, 2017年3月.

「免震構造システムを対象とした積層ゴム大変形時の力学エネルギー評価手法の構築」, 第731号, 2017年1月.

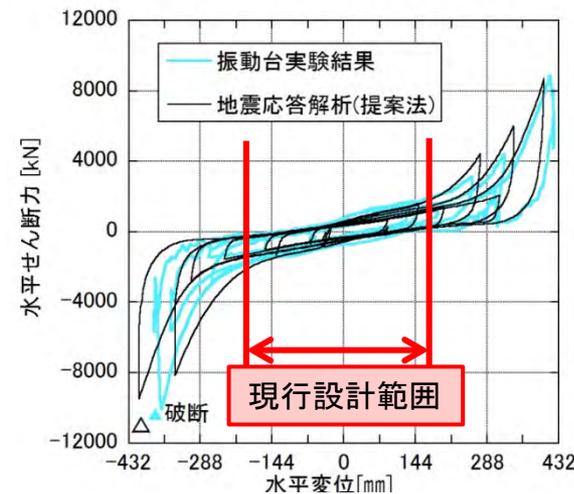
「破断試験による大型鉛プラグ入り積層ゴムの終局特性評価」, 第732号, 2017年2月.(国プロ成果)

積層ゴム1個の静的試験



(a) 鉛プラグ入り積層ゴム単体試験結果と提案モデル

積層ゴム6個の振動台実験



(b) 振動台実験の地震応答解析結果

図 大型免震構造物模型の振動台実験データを用いた提案法の検証(復元力モデルの評価)

静的試験データから動的な破断事象をシミュレートできる見通しを得た。

基礎岩盤・斜面の遠心力模型実験と解析

● 研究の背景

■ 重要構造物の基礎岩盤の現行の評価手法（原子力発電所の場合）

- 動的解析手法：周波数領域の2次元等価線形解析
- 支持性能の評価：**すべり安全率**，支持力，基礎底面の傾斜

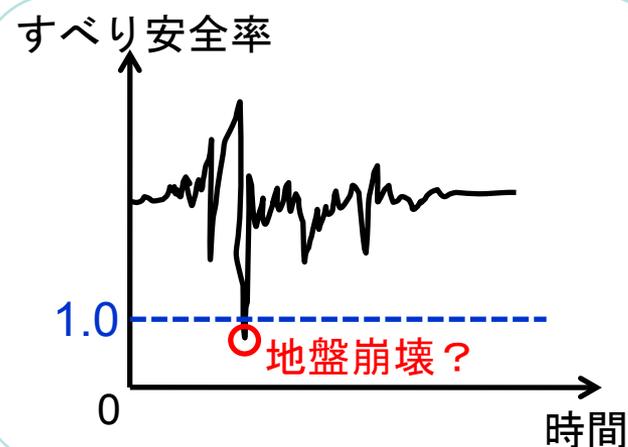
■ 重要構造物周辺の岩盤斜面の現行の評価手法（原子力発電所の場合）

- 動的解析手法：周波数領域の2次元等価線形解析
- 安定性評価：**すべり安全率**

<問題点>

※すべり安全率はすべりによる変形が生じる可能性の有無を判定するのみで，変位量まで評価できる手法ではない

※瞬間的な力のつり合いを満足できない場合に直ちに地盤が不安定化するわけではない



● 研究の目的

■ 今後の評価手法の動向

- 動的解析手法：**破壊進展を考慮できる非線形解析**
- 支持性能の評価：**変位量照査**

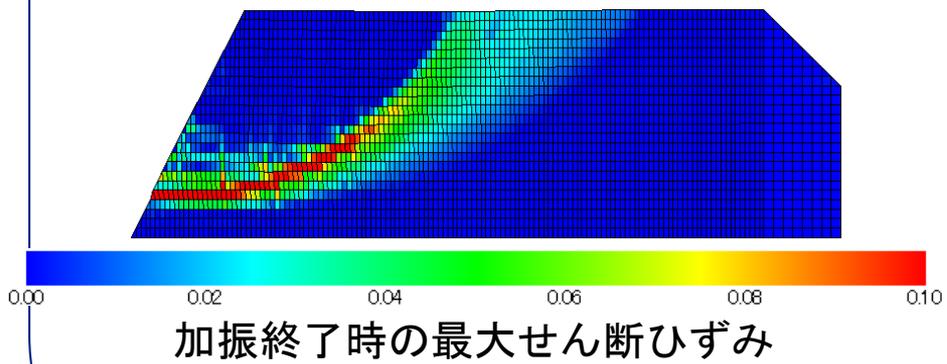
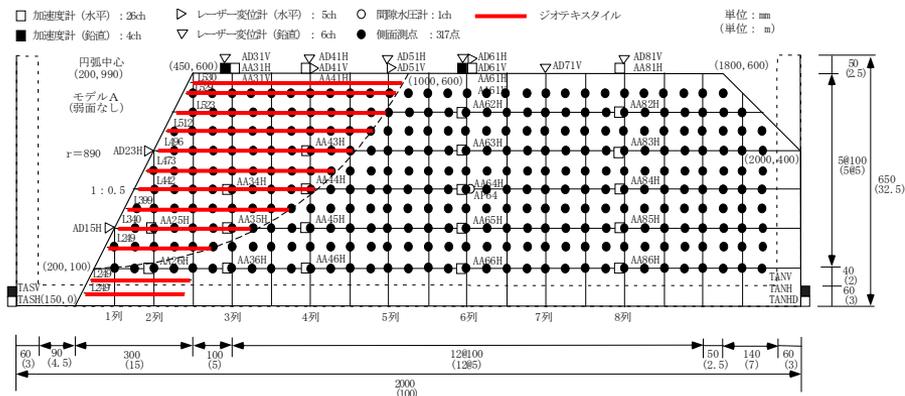


非線形解析手法の開発と
模型実験による検証

基礎岩盤・斜面の遠心力模型実験と解析

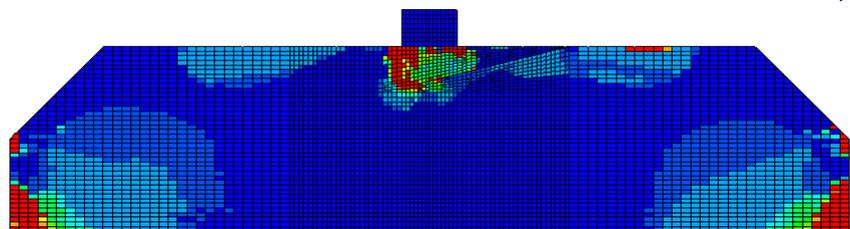
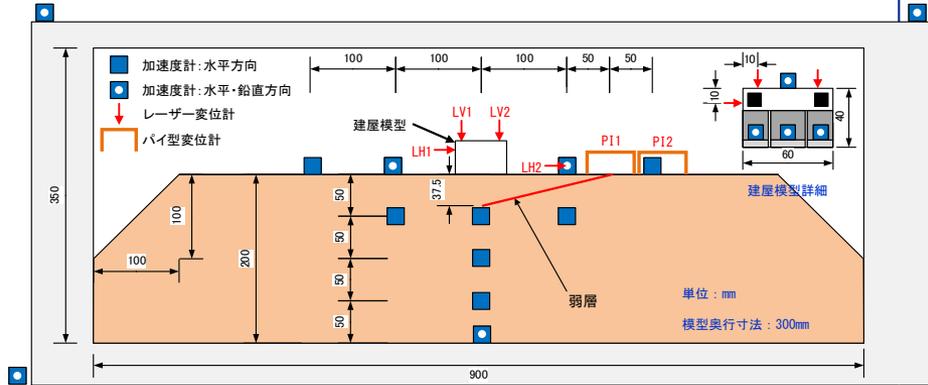
軟岩斜面

脆性的な崩落を防止する対策（ジオテキスタイル）を有する斜面



基礎岩盤

建屋下部に弱層を有する基礎岩盤

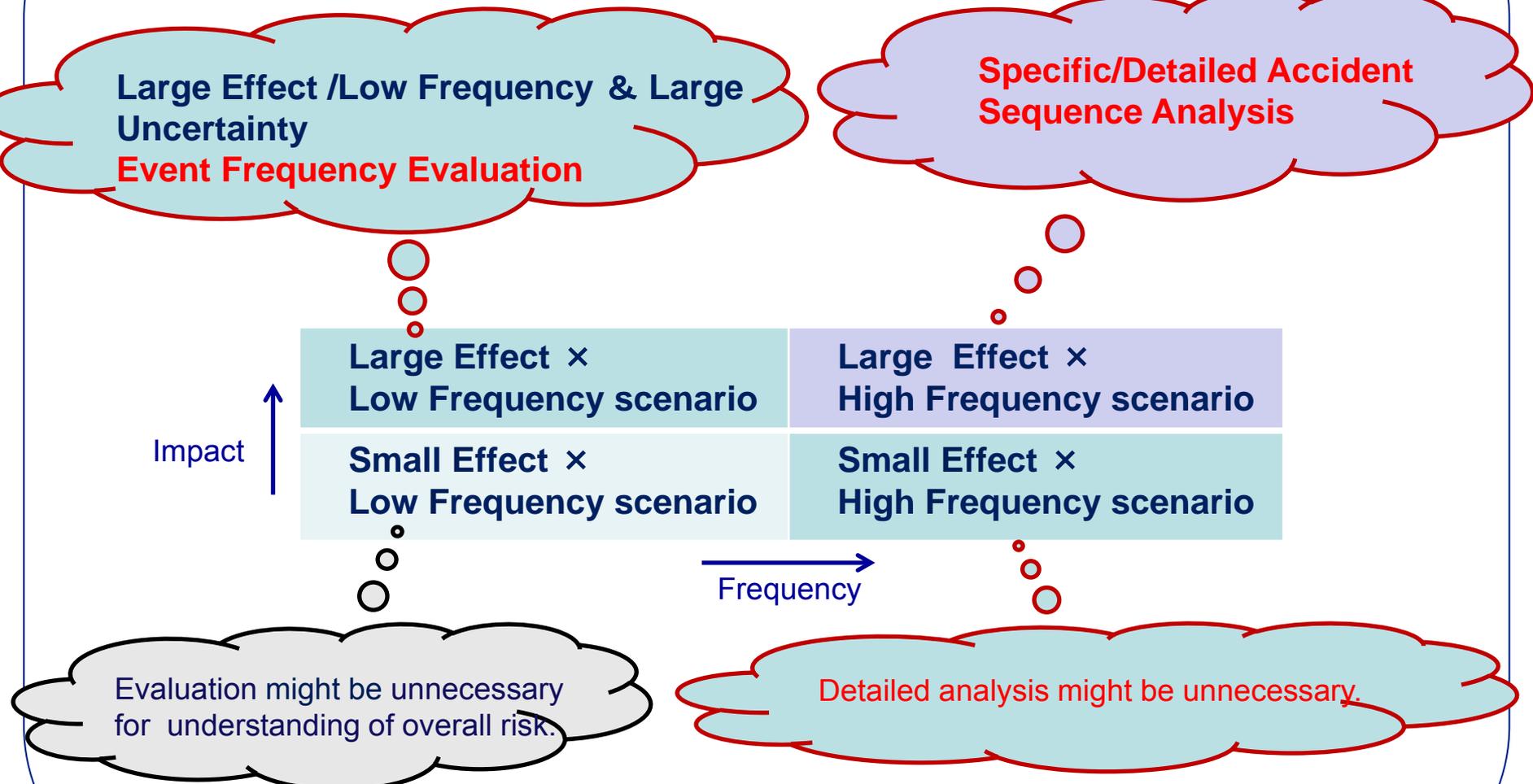


時刻歴非線形解析による破壊の様子

まとめと今後の課題

解析では模型実験の再現が概ね可能 ⇒ 他の模型実験, 現地等への適用を目指す

Classification of Accident Scenario

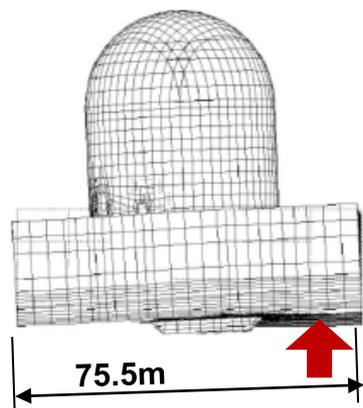


Fragility Evaluation of Reactor Building/Structure

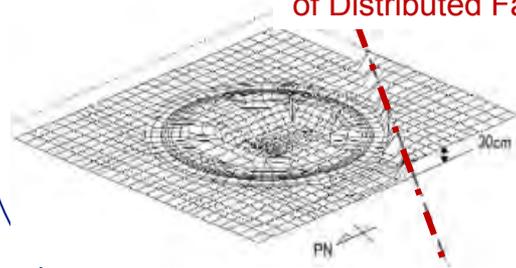
- Consideration of deformation and damage of PWR NPP due to fault displacement
 - Consider damage of components inside the building
 - Fragility of the steam generator was evaluated as a representative large-sized component
 - Comparison between forcible displacement and design / ultimate capacity

Typical example of fragility evaluation

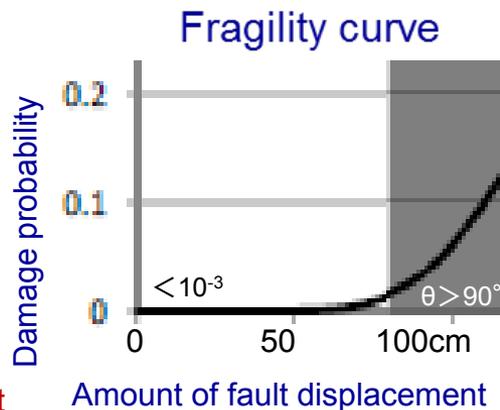
OPWR NPP



Position of Distributed Fault

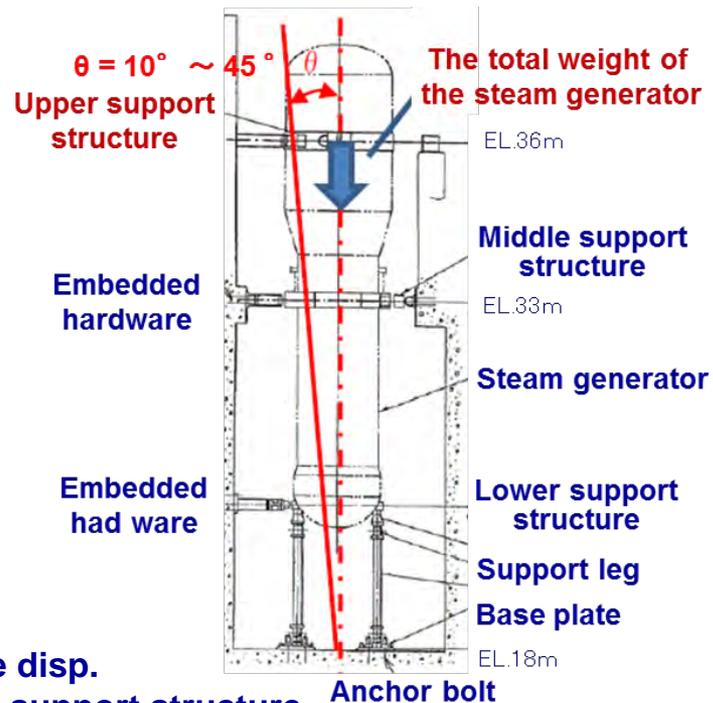


○ Steam generator (Outline drawing)



○ Comparison between forcible disp. and design capacity of Upper support structure

Pert/Damage Mode	Inclination (°)	Force (kN)	Shear Stress (MPa)	
Turn buckle / Shear force	40°	2002	Generated stress	Allowable capacity
	=50.5cm		263	582



津波堆積物現地調査

目的

国内19地点の2011年3.11津波堆積物(図-1)、および古津波堆積物を調査・分析し、汎用的な津波調査手法、認定手法を確立する。

本年度の作業内容・成果

<2011年津波堆積物>

- 供給源の鉱物組成の影響を受けて、各地点の化学分析の値が大きく変動する。供給源の鉱物組成を考慮した認定手法が必要と考えられる(図-2)。
- 津波堆積物に含まれる海起源の珪藻は少量であり、淡水生の方が多い。また、その産出率は。堆積物中の深度に依存する可能性がある(図-3)。

<古津波堆積物>

- 宮城県で取得した古津波堆積物を含むと考えられる試料について分析を実施中(図-4)。
- 福島県において貞観津波堆積物を含む古津波堆積物が保存されている地点で調査を開始した。

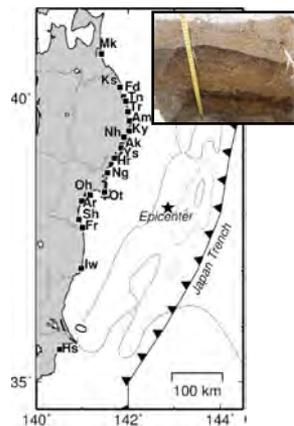


図-1 3.11津波堆積物の調査地点と堆積物の一例。

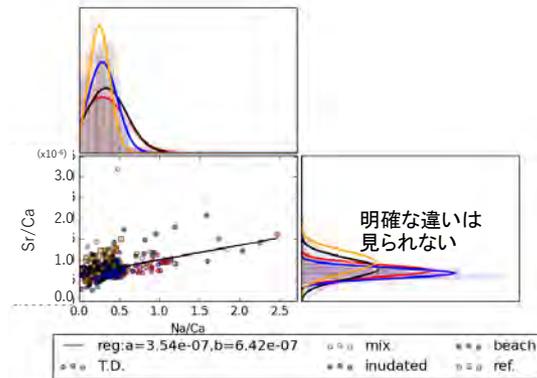


図-2 海浜砂、津波堆積物、土壌のSr/Ca、Na/Ca。土壌も津波堆積物と同程度の値を示す場合がある。

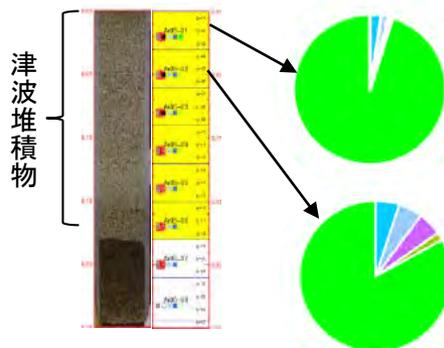


図-3 津波堆積物の深度別の産出珪藻種 表層よりも下位の層準で海生種、汽水種が高率で産出する傾向がみられることが多い。



図-4 宮城県鮫浦湾における現地調査。3.11津波堆積物の分布状況から、有力な調査地点と考えられた。

津波堆積物実験

目的

大規模水理実験(図-1)により津波堆積物が形成されるまでの物理的過程を解明し、堆積物から津波諸元を逆推算する方法について検討する

本年度の作業内容・成果

- 砂丘を越える津波堆積物の陸上での挙動を計測し、津波堆積物が反映する水理量について整理した(図-2)。
- 砂丘を有する地形の場合、陸上堆積物中の沖合土砂量の割合は非常に少ない。海性生物遺骸等を用いた認定手法の適用において留意すべき特徴である(図-3)。
- 遡上流中の鉛直流砂濃度を計測し、トラクションカーペット(土石流的な流砂移動)が生じていないことを確認した(図-4)。
- 堆積物の底部に見られる逆級化構造(粗粒が細粒より上部に位置する構造)が、堆積過程で生じていることを明らかにした(図-4)

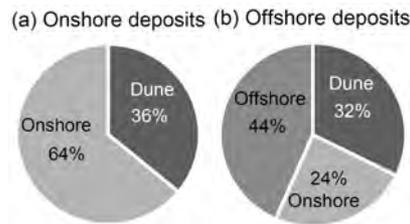
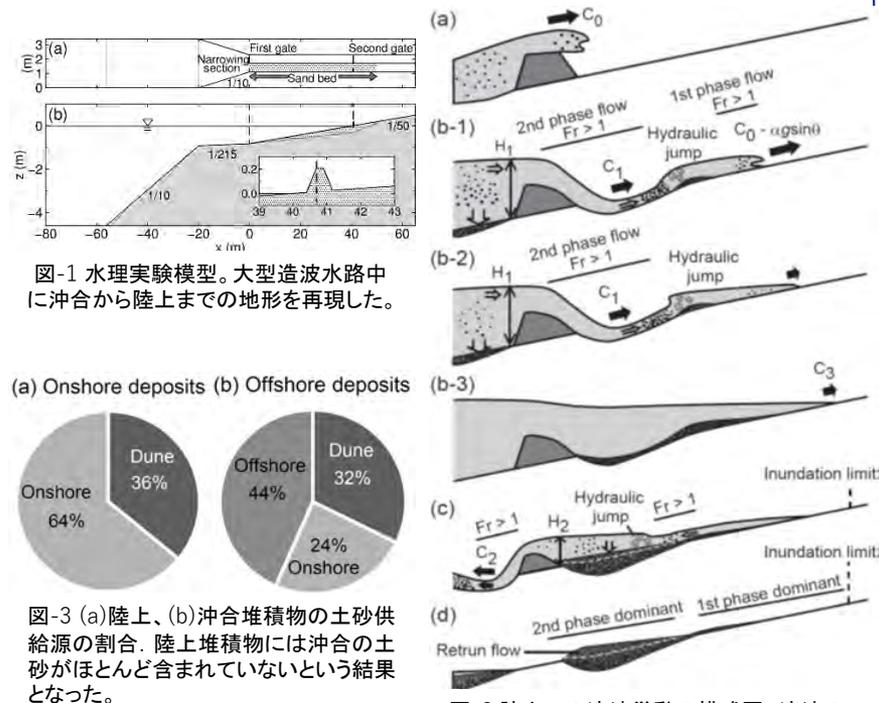
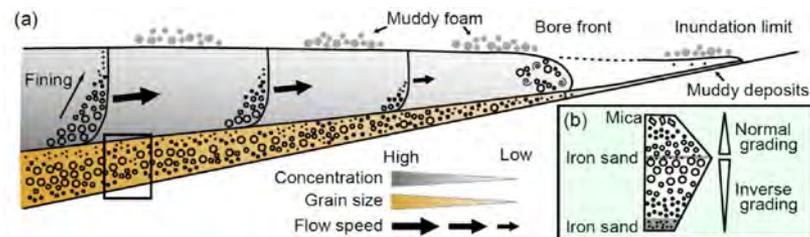
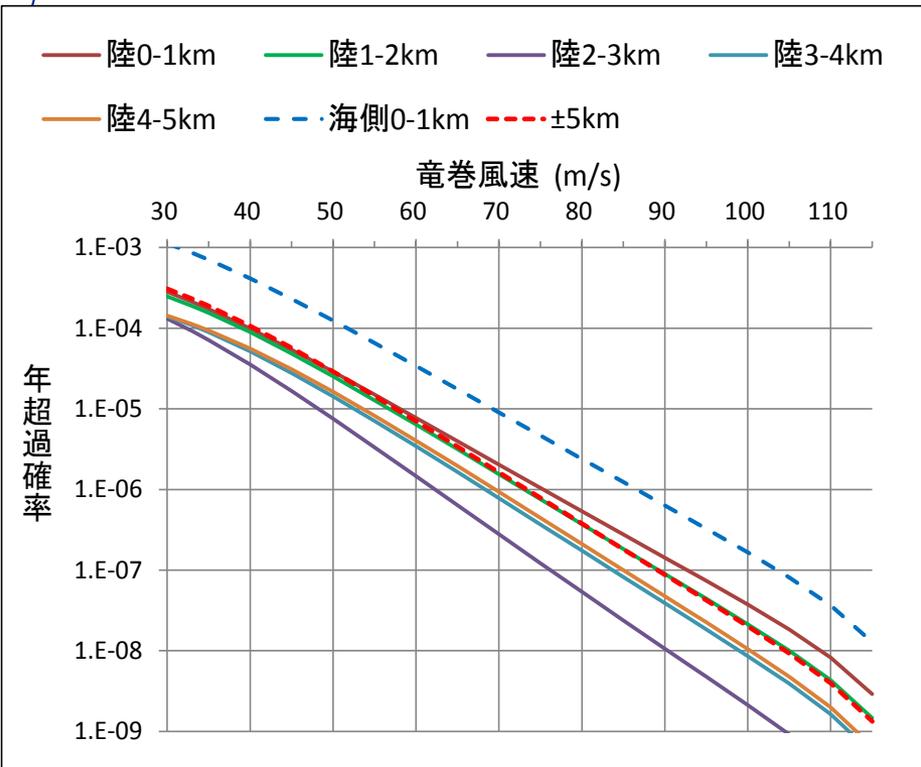


図-3 (a)陸上、(b)沖合堆積物の土砂供給源の割合。陸上堆積物には沖合の土砂がほとんど含まれていないという結果となった。

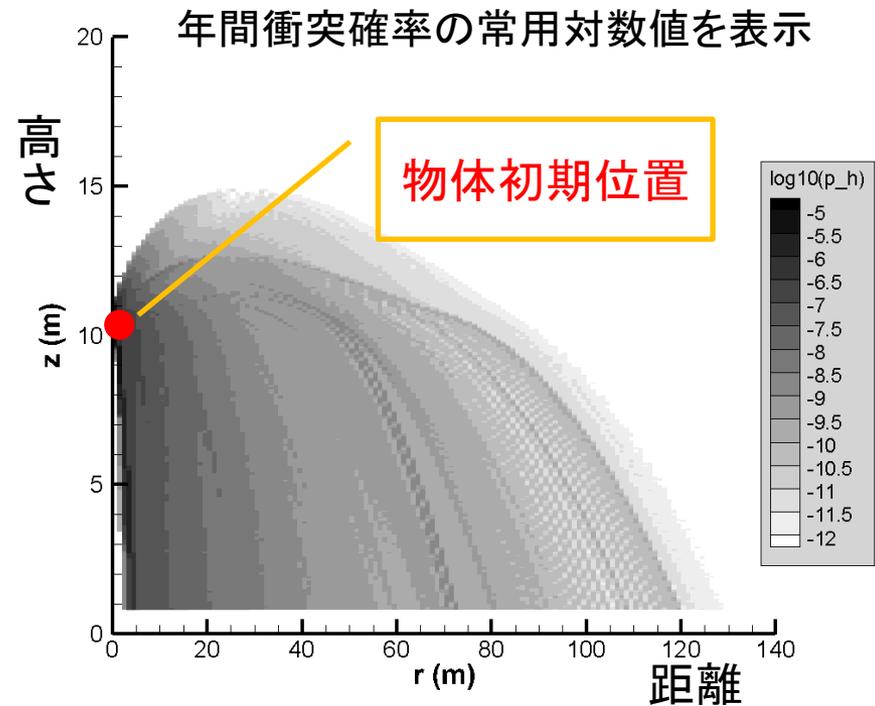


竜巻ハザード評価モデル



TOWLAによる竜巻風速の年超過確率の計算例

【文献】平口博丸, 他、沿岸立地原子力発電所の竜巻風速ハザードモデルTOWLAの開発、電力中央研究所 研究報告書 Q15005, 2016.
<http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/O15005.html>

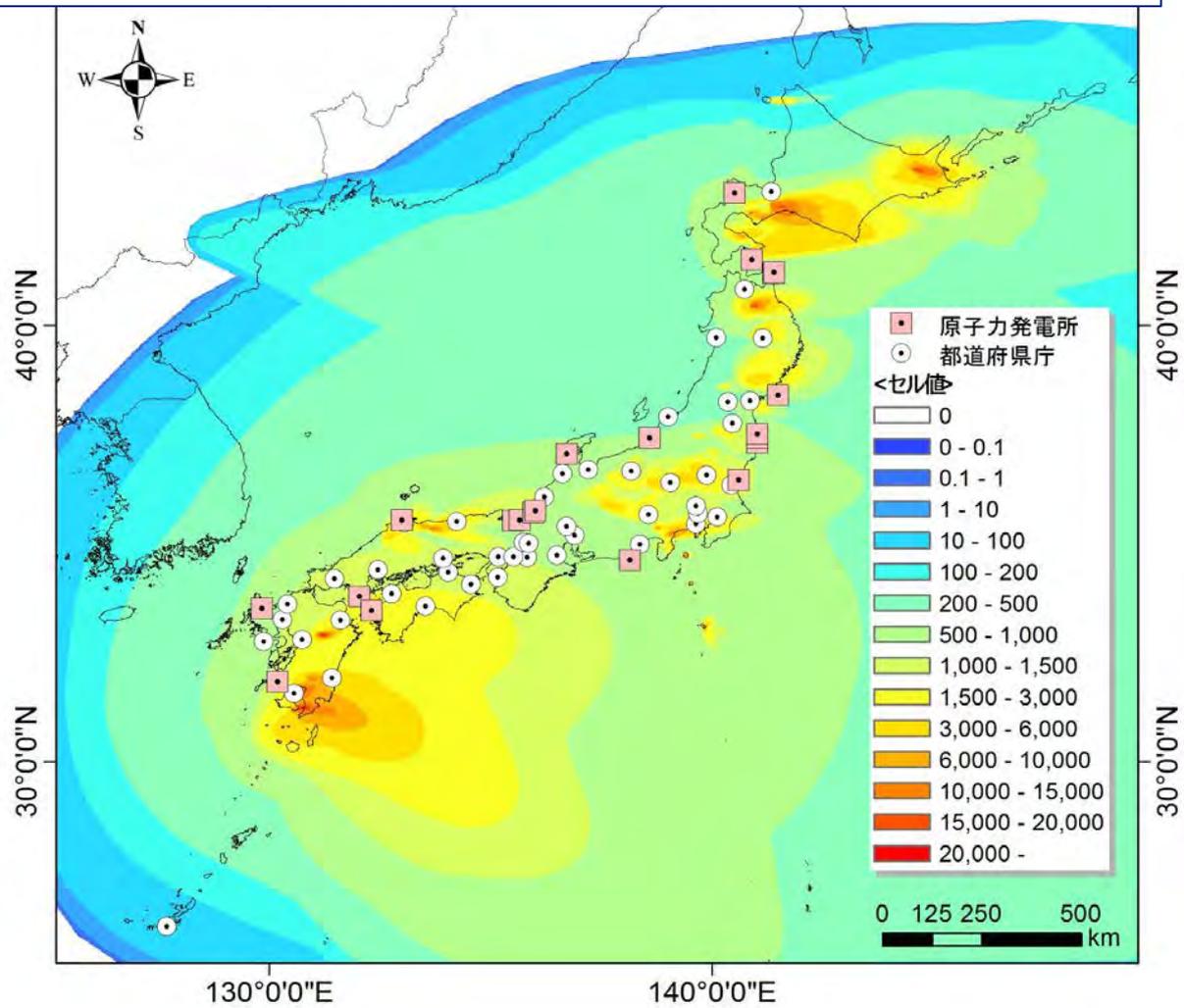


TOMAXIIによる単位水平面積当たりの年間衝突確率の空間分布の計算例

【文献】Y.Eguchi, et al., An Estimation Method for Tornado Missile Strike Probability under Assumption of Statistically Isotropic Tornado Path Directions, Proc. of 2017 Int. Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis, pp.241-246, Pittsburgh, PA, USA, 2017.

降下火山灰: 全国規模の災害 (荷重 > 200 kg/m²)

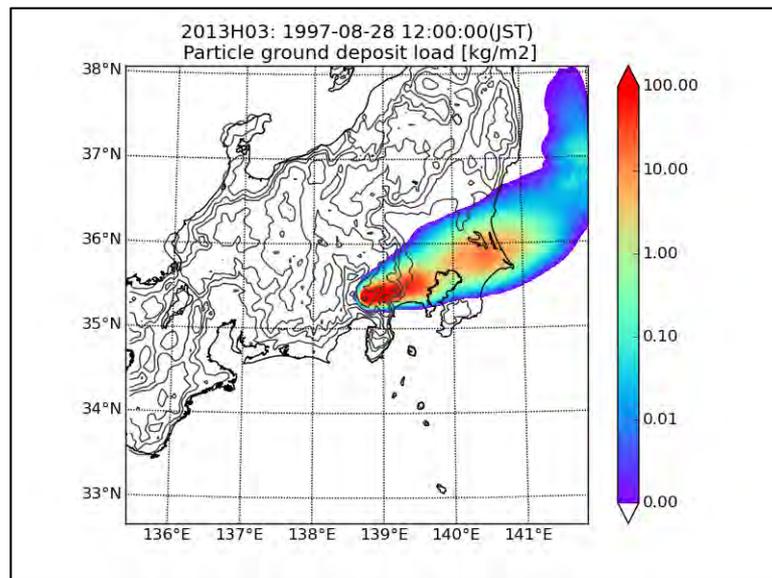
過去10万年間の累積荷重 (kg/m²) を示す



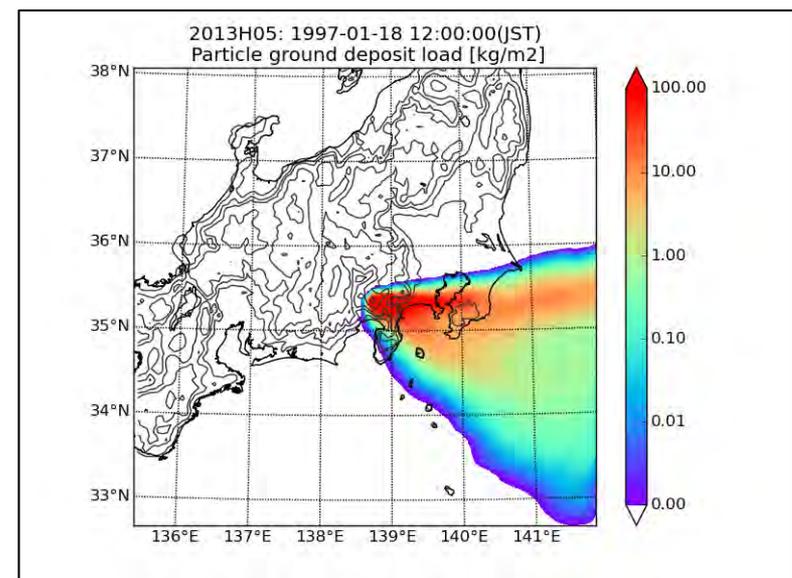
降灰現象の数値解析

- 季節変化する風向条件の付与手法を開発

夏季・6時間噴火



冬季・24時間噴火



富士山宝永(1707年)噴火に相当する規模の降灰を再現
長時間の噴火では降灰分布域の幅が拡大する