第３回京都大学原子炉実験所　原子力安全基盤科学研究シンポジウム
ー東京電力福島第一原子力発電所事故後の地震・津波と原子力リスクー

地震・津波等外的事象に対する原子力リスクの現状*

２０１４年１０月３０日
京都大学芝蘭会館

東京都市大学 客員教授
京都大学・早稲田大学 非常勤講師
蛯沢　勝三

＊：　東京都市大学/早稲田大学大学院共同原子力専攻主催　原子力安全工学科・都市工学科共催
第8回未来エネルギーシンポジウムー巨大地震に備えるリスク評価・耐震技術ー　の講演資料（蛯沢）を参照し一部加筆

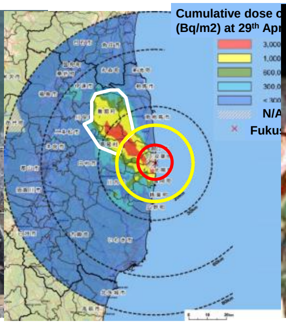
紹介内容

Ⅰ．紹介の背景
Ⅱ．原子力規制委員会の新規制基準（地震・津波）及び地域防災計画の概要
Ⅲ．地震・津波等外的事象に対するリスク評価の現状
（１）地震・津波PRA手順及び有用リスク情報
（２）地震PRA及び津波PRA技術の現状
（３）地震・津波の重畳、マルチユニットを考慮したPRAの現状
Ⅳ．地震・津波等外的事象に対する原子力防災システムTiPEEZ及び原子力リスクのコミュニケーションの現状
（１）TiPEEZの実践
（２）柏崎・刈羽地域での原子力リスクコミュニケーションの実践
Ⅴ．今後の活動の方向性
（１）バックフィット・地域防災と原子力リスクコミュニケーションの一体化
（２）原子力リスクに係る人材育成

TiPEEZ:: Protection of NPPs against Tsunami and Post Earthquake consideration in the External Zone

Ⅰ．紹介の背景

- ■ 旧原子力安全基盤機構(JNES)は、地震PRA手法高度化を進めると共に、スマトラ沖津波(2004年)を踏まえ、IAEA特別拠出金事業(EBP)「津波PRA」/「地震・津波に対する原子力防災システムTiPEEZ」プロジェクトを2007年に開始した。
- ■ 東北地方太平洋沖地震(2011年3月)では、津波が福島第1原子力発電所に襲来し、炉心が損傷し、放射性物質が敷地外に放散された。
- ■ 多くの住民の方々が緊急に避難し、現在も避難生活を強いられている。
- ■ “地震・津波PRA/残余のリスク”/“原子力防災”/“原子力リスクコミュニケーション”に係る課題の重要性は、一層顕在化した。
- ■ 原子力規制委員会は、新規制基準/原子力災害対策指針を策定・改定。
- ■ JNES及び新潟工大は、柏崎・刈羽地域を対象として、柏崎市・刈羽村の協力のもと、TiPEEZを用いた市民参加型の実践的研究を実施。



現場主義に基づく現地調査による課題同定 （1/3）

■ 現地調査

①H23.5.3-7（宮城県女川町～岩手県久慈地区までの被害調査）

②H23.12.（女川NPPの被害調査（IAEA/ISSC）

■ 調査に基づく重要課題の同定

① 巨大地震・津波の発生、地震及び津波ハザーの組み合せ巨大余震・誘発地震の発生

② マルチサイト・ユニットにおけるリスク評価

③ 自然災害と原子力災害の複合

④ サポート系（海水給水系、電源系、信号系）機能喪失による短時間での炉心損傷

⑤ 複数の構造物・機器の同時損傷

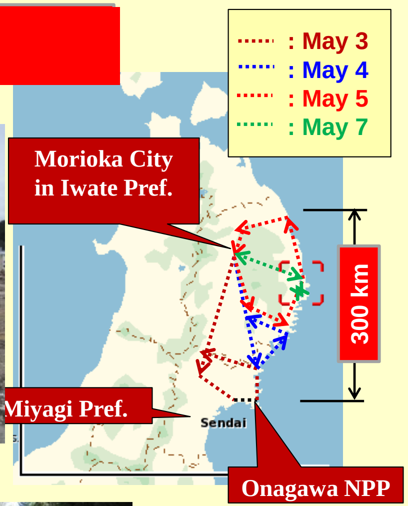
⑥ 隣接ユニットの従属性（U3の水素ガスのU4への影響）

⑦ アクシデントマネジメント対策の重要性

⑧ 原子力リスク情報の伝達の有り方

⑨ 市民とのコミュニケーションの有り方

現地調査



岩手県宮古市姉吉地区での最大遡上38.9mと石碑

波力

洗掘

主要報告書の重要指摘　（2/3）

■ 政府IAEA報告書における２８の教訓(2011.6)：全項目別添A

●教訓27

　リスク管理における確率論的安全評価手法(PSA)の効果的利用(不確かさに関する知見を踏まえつつ、PSAを更に積極的かつ迅速に活用し、それに基づく効果的なアクシデントマネジメント対策を含む安全向上策を構築する。)

●教訓19

　事故に関するコミュニケーションの強化(周辺住民等に対して、事故の状況や対応等に関する的確な情報提供、放射線影響等についての適切な説明等の取組みを強化する。事故進行中での情報公表について、今後のリスクも含めて示すことを情報公表の留意点とする。)

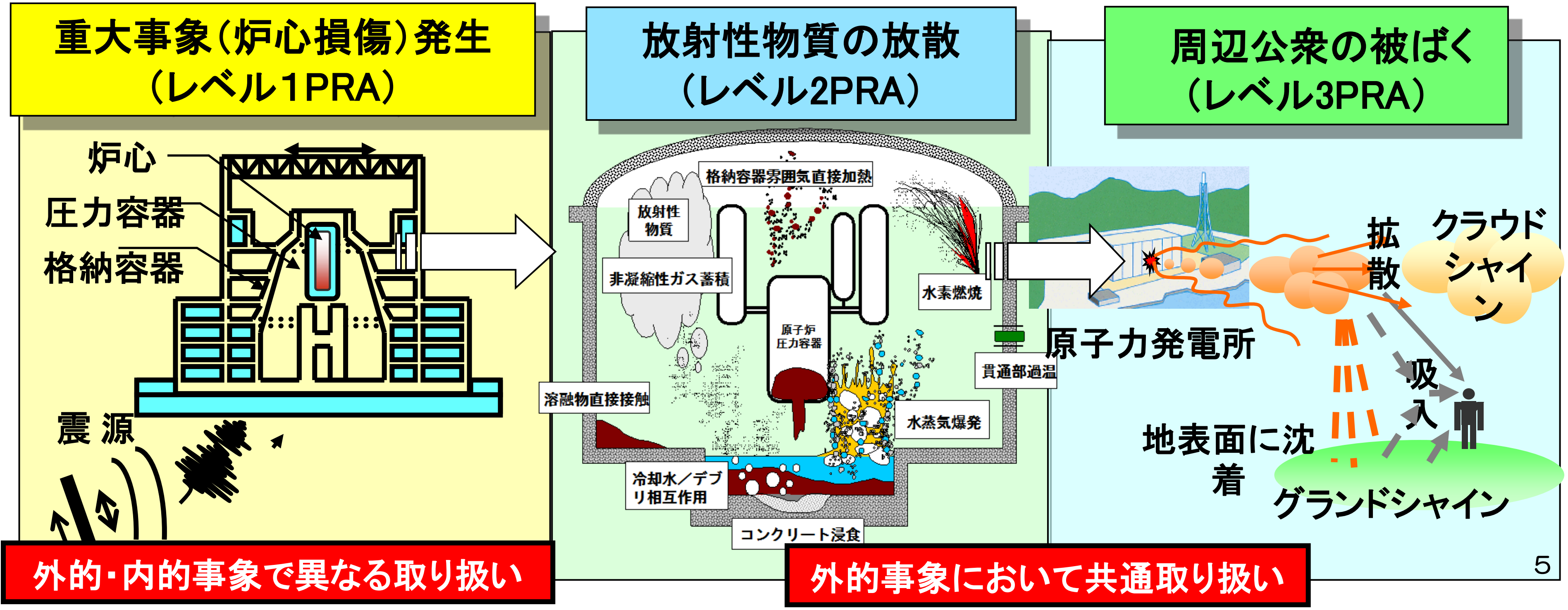
「残余のリスク」の定義　（3/3）

■ 旧原子力安全委員会 耐震設計審査指針（ 2006年9月改訂）：
「残余のリスク」明記

(1) 基準地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぼすことによる**施設の重大損傷事象が発生**すること　⇒ レベル1 PRA対応

(2) **大量の放射性物質が放散**する事象が発生すること　⇒ レベル2 PRA対応

(3) **周辺公衆の放射線被ばく**による災害を及ぼすこと　⇒ レベル3 PRA対応



Ⅱ. 原子力規制委員会の新規制基準及び地域防災計画の概要

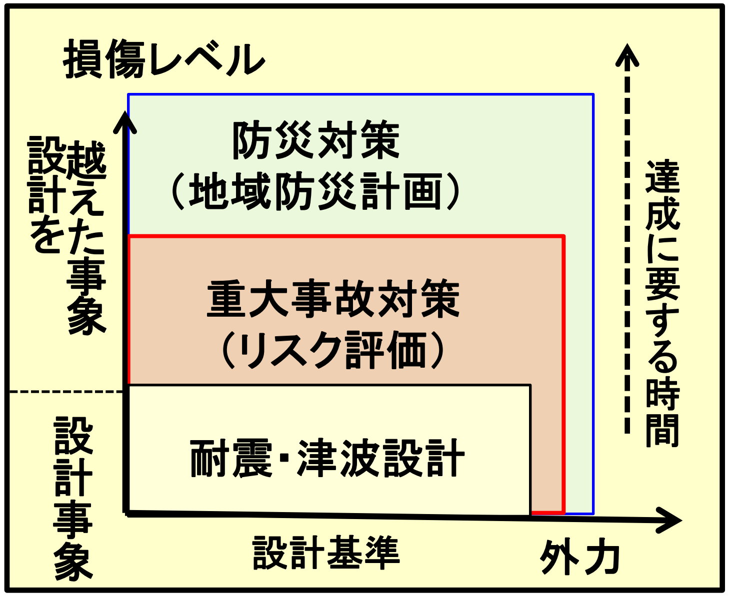
■ 原子力規制委員会は、下記の規制基準・対策指針を策定

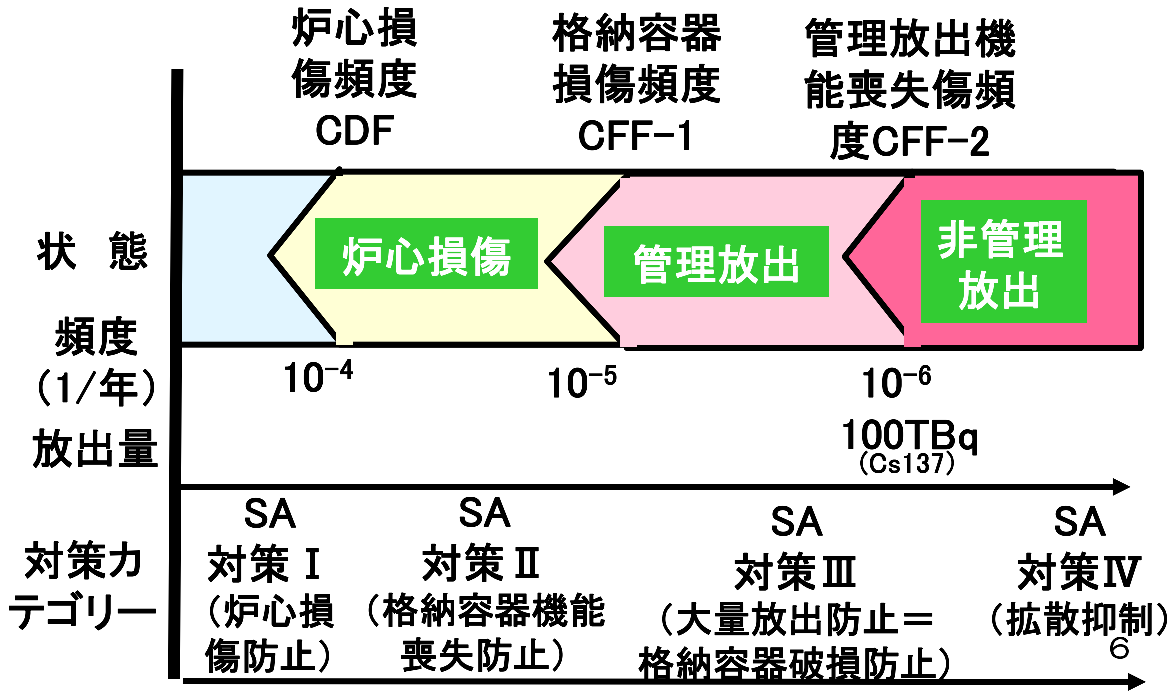
・新規制基準（地震・津波等）(2013年6月）:地震・津波設計を明記。

・同基準（重大事故対策）（同上）： 有効性評価にPRA等の実施を明記。

・原子力災害対策指針(2012年10月）:地域防災計画を明記

・安全目標に関し前回委員会までに議論された事項（2013年4月）:安全目標

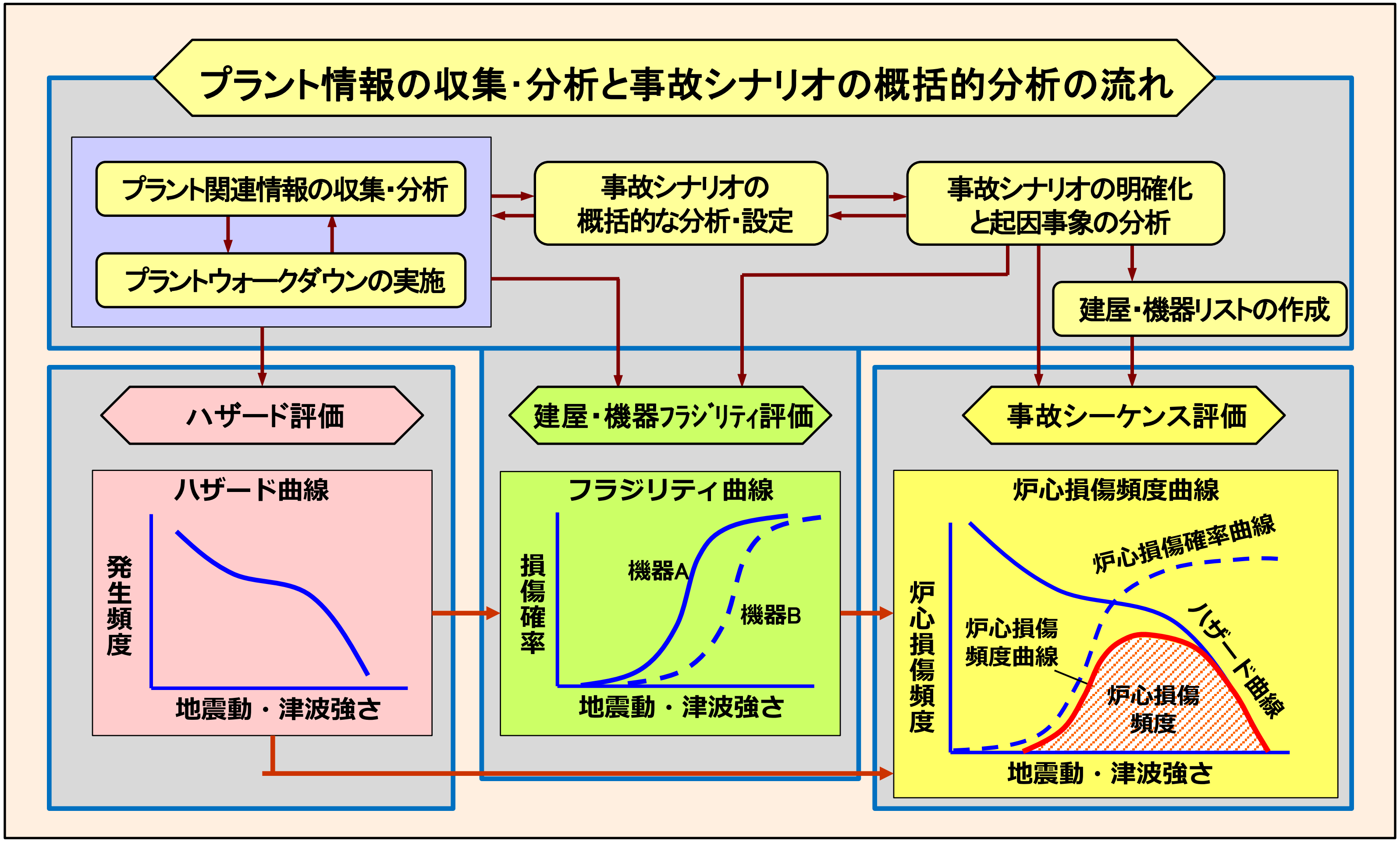




Ⅲ. 地震・津波等外的事象に対するリスク評価の現状

Ⅲ−1 地震・津波PRA手順及び有用リスク情報

■ 地震・津波PRA手順



地震・津波PRAからの有用リスク情報

■ 外的事象PRAから得られる有用情報

(1) 炉心損傷頻度（CDF）へ寄与する事故シーケンス、システム、機器の同定（各種安全系がどのように破られるか）

⇒ **多重防護の有効性**

(2) 外的事象に対し、複数機器の同時損傷によるCDFへの影響

⇒ **共通原因損傷**

(3) CDFへ寄与する外的事象の大きさ及び超過頻度の範囲

⇒ **信頼性の妥当性判断**

(4) 上記(1)～(3)を踏まえた重大事故対策

⇒ **対象機器等の同定**

(5) CDFの把握

⇒ **安全目標/性能目標との対比からリスクの程度の国際標準との比較**

■ 評価条件、評価モデル、使用データ、評価結果の明示

⇒ **透明性、説明性**

Ⅲ−2 地震PRA技術の現状

■ 地震PRA手法は、米国で1980年、日本で1985年から開発・整備され、30年近い実績を有する。

■ 米国では、U.S.NRCの指示により、1990年代に簡易地震PRA手法による個別プラント評価を行い、評価結果に基づき改善を実施。

■ 日本原子力学会 地震PRA実施基準は、OECD/NEA主催の地震PRA国際会議(2006年)において、U.S.NRCや他の多くの参加機関から極めて高い評価を受けた。

■ 同国際会議において、「地震PRA技術は成熟している」との決議がなされた。

■ U.S.NRCは、上記地震PRA実施基準を英訳し、基準化中である。

⇒ 我が国において"地震PRA技術は成熟していないので使えれない" との議論あり

⇒ "State of the Art 地震PRA技術を用い、プラント改善の実施は国際的常道"

地震PRAの実行的取り扱い（1/2）

地震PRA評価手順

●地震ハザード評価

（活用）← 基準地震動Ss評価での超過確率 ⇒地震ハザード評価済み

●フラジリティ評価
（原研法の場合※）
・現実的応答
-設計応答
-応答係数
（設計応答の保守係数）
（中央値/標準偏差）
・耐力
-中央値/標準偏差

（活用）← 構造健全性評価 ⇒設計応答評価済み

（活用）← 振動台試験等 ⇒耐力の標準データ整備済み

●事故シーケンス評価
・フォールトツリー（FT）
・イベントツリー（ET）

（活用）← 内的事象定期安全レビュー ⇒FT･ET評価済み

新規制基準適合性評価での取扱い

■ 新規制基準適合性評価等のデータを用いて、効率的･実効的評価が可能

地震PRAに基づく重大事故対策の評価例　(2/2)

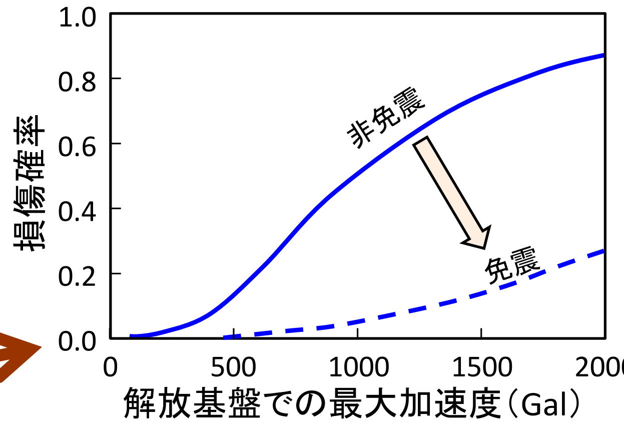
JNESでは地震PRA手法を整備し重大事故対策を含めた有効性を定量評価

炉心損傷頻度(CDF)に寄与する機器を抽出
⇒非常用ディーゼル発電機(DG)、電気盤等

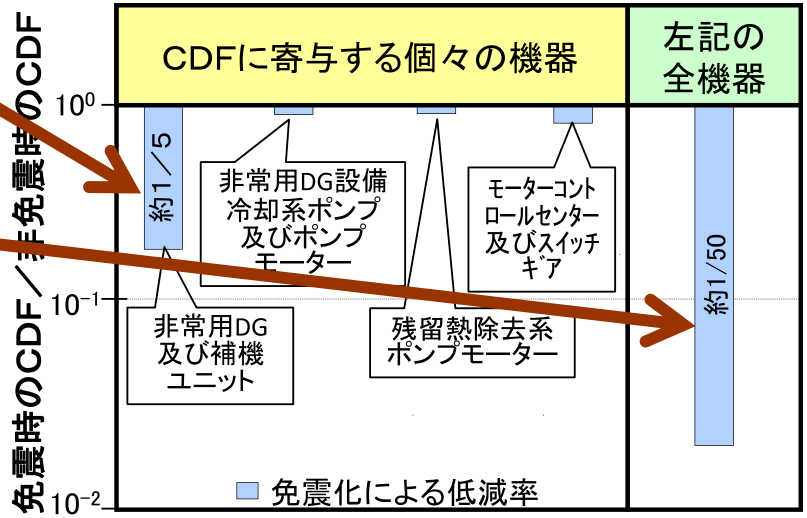
免震化により地震応答が非免震の1／3～1／5に低減する条件下で地震PRAを実施

非常用DG及び補機ユニットを免震化
⇒ CDFは約1／5に低減

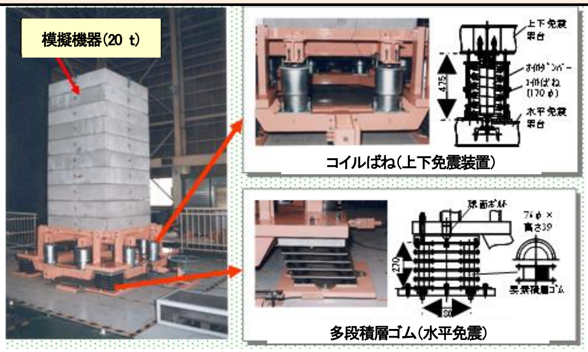
非常用DGを含むCDFへの寄与が大きい全ての機器を免震化
⇒ CDFは約1／50に低減



非常用DGの損傷確率評価例
(応答低減1／3)



免震化による CDF低減効果の評価例
(応答低減1／3)



機器免震試験

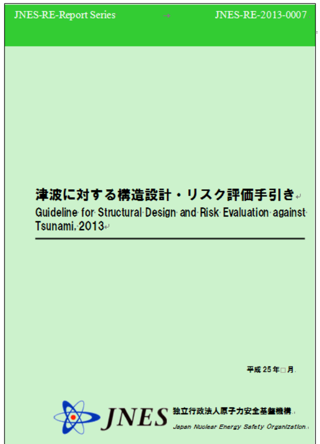
Ⅲ－3　津波PRA技術の現状

- ■ JNESは、2004年度から津波PRA手法整備を進め、約10年の実績を有す。
- ■ スマトラ沖津波(2004.12)におけるインドNPP海水ポンプ冠水を踏まえ、IAEA/EBP（2007.4～2010.3)を提案し、津波PRA手法を高度化。
- ■ 津波PRA研究成果(津波事故シナリオ)は、原子力学会(2007.9)、世界地震工学会議(2008.10)、IAEA国際津波EBP会議(2010.3)等で発表。

  同定津波事故シナリオは、福島第1NPP事故(2011.3)と良く一致。
- ■ 成果は日本原子力学会津波PRA実施基準(2012年)に反映された。
- ■ 東北地方太平洋沖地震を踏まえ、「津波に対する構造設計・リスク評価手引き」を策定し、福島第1NPPに適用し、その有効性を確認(2014.2)。
- ■ 原子学会基準・JNES評価手引きは、IAEA津波基準へ反映中。

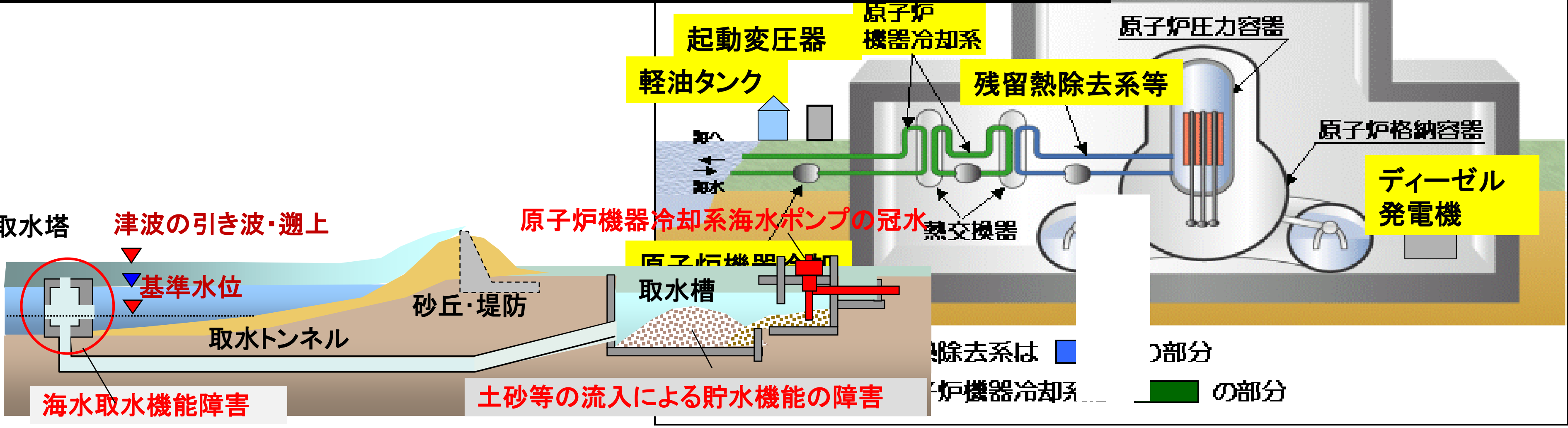
スマトラ沖津波

インド：マドラスビーチ



東北地震・津波による津波PRAの有用性の確認（1/2）

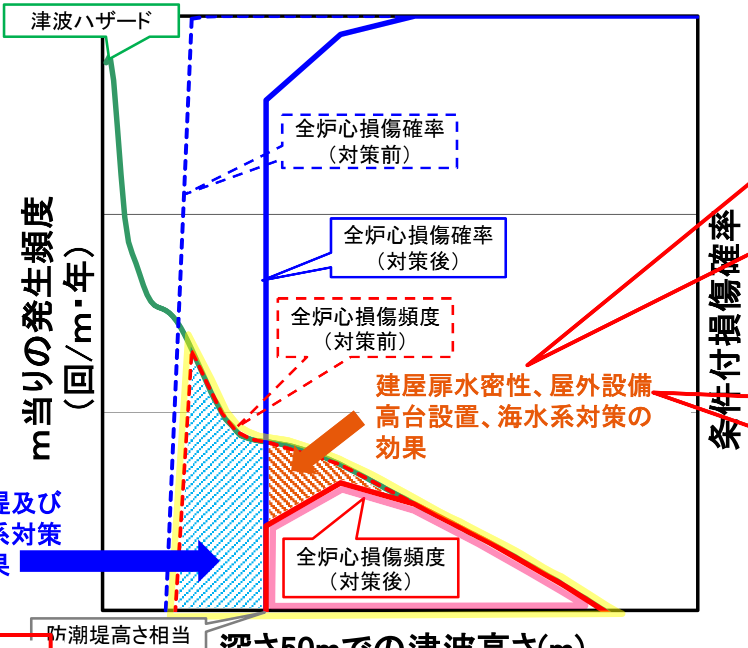
津浪PRAでの同定事故シナリオ	福島NPPでの事故
(1) 海水給水系の機能喪失	左記発生
(2) 電源の機能喪失	同上
(3) 費用用ディーゼル発電機の機能喪失	同上
(4) 開閉所変圧器の機能喪失	同上
(5) 原子炉建屋の冠水	同上
(6) タービン建屋の冠水	同上



■ 東北地震前の津波PRAの事故シナリオと福島第1の事故は、良く一致
⇒　津波PRAの有用性が明らかになった。

津波PRAの有効性の確認（2/2）

防潮堤の設置例 ※1



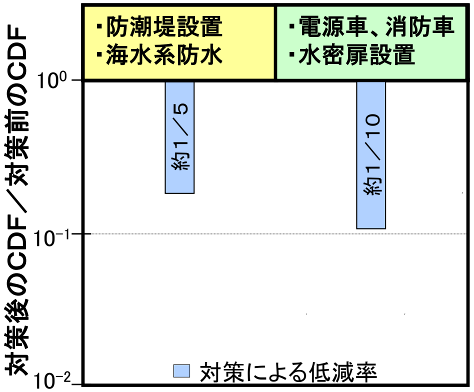
炉心損傷頻度の評価例

※1

※2

※1

※1：中部電力（株）のHPより
※2：北陸電力（株）のHPより

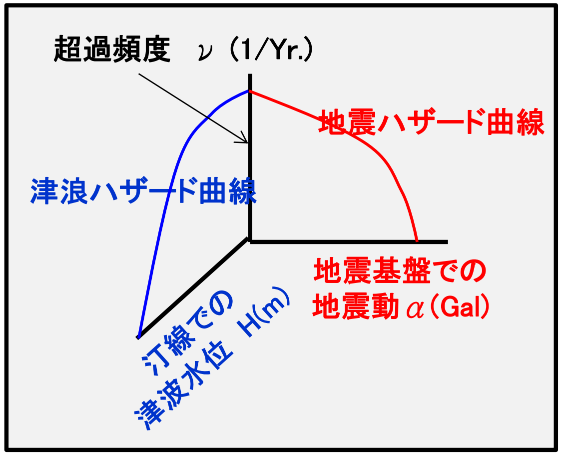


対策による CDF低減効果の評価例

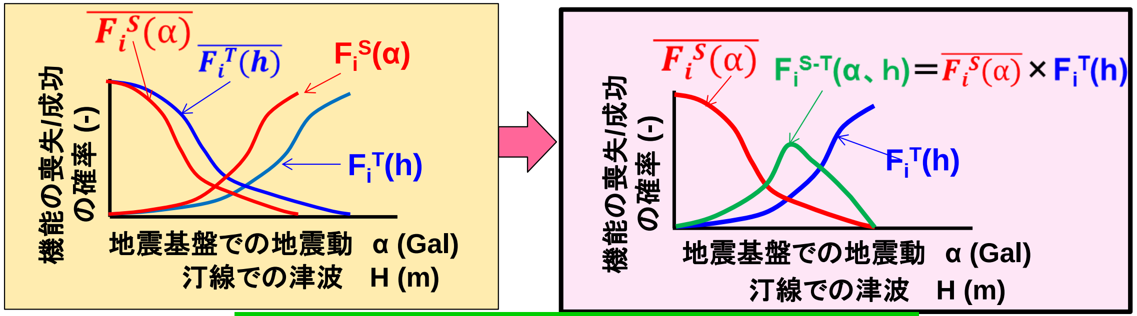
防潮堤設置＋海水系防水対策 ⇒ CDFは約1/5に低減
上記＋電源車、消防車＋水密扉 ⇒ CDFは約1/10に低減

Ⅲ-4　地震及び津波の重畳を考慮した地震-津波PRA手法

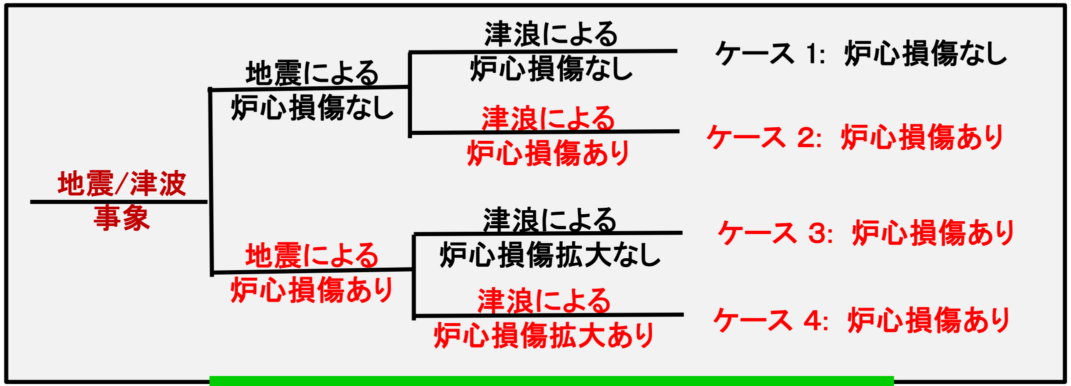
- ■ 地震及び津波事象に対するPRA手法は、両事象の従属性を考慮せずに、互いに独立に地震及び津波PRA手法として整備された。
- ■ 東北地震・津波による福島NPP事故の教訓から、地震及び津波の重畳を考慮した地震-津波PRA手法の開発が必須と考える。
- ■ **地震-津波PRAの概念・手順を原子力学会地震PRA基準、IAEA基準に反映。**



重畳を考慮したハザード概念



重畳を考慮したフラジリティ概念



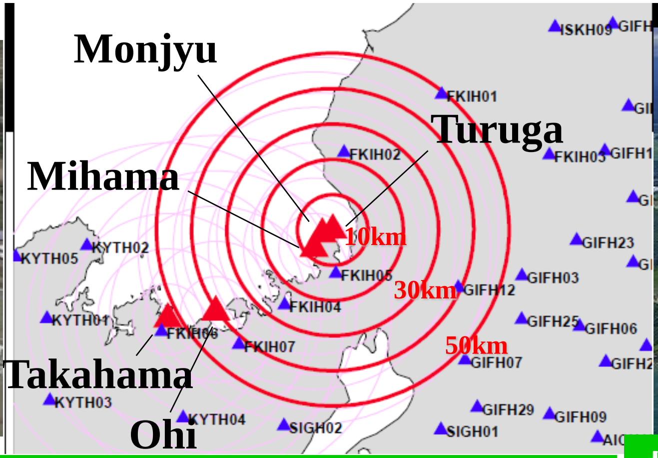
重畳を考慮した事故シナリ概念

Ⅲ−5　多数基立地における地震/津波PRAの取り扱い

■ 日本における多数基/多数サイト及び地域の現状

- 日本では、多数基/多数サイト/地域がある。
- 地震動は、広域の施設に影響を及ぼす（半径約 30-300 km)
- 我が国の耐震設計は、標準化されている。
- 強震動下において、複数の機器が同時に機能喪失する可能性が高い。

柏崎刈羽NPP (7 基/1 サイト)



若狭地域 (14 基 / 5 サイト/1 地域)

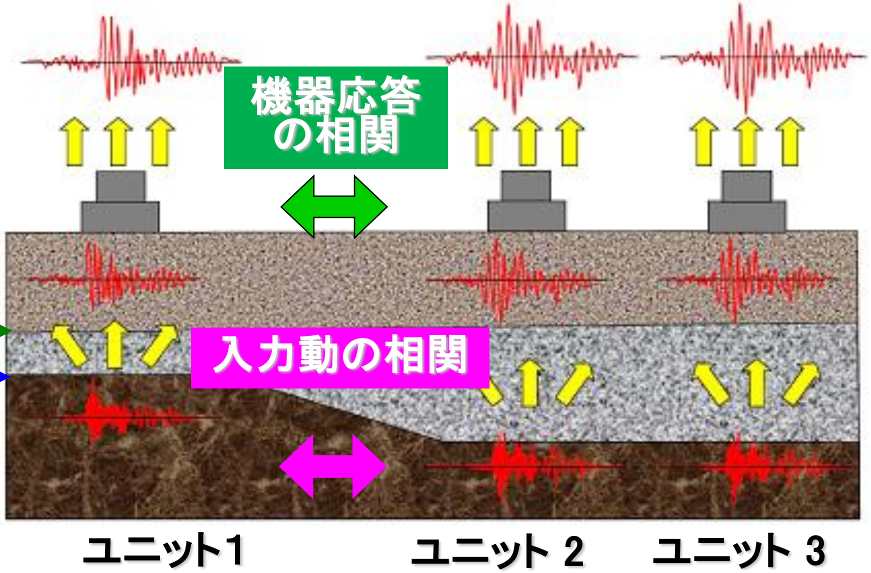
福島第1NPP (6 基/1 サイト)

マルチユニットにおける損傷の相関の概念

応答の相関
R= (a) x (b)

建屋・機器の応答の相関 (a)
- 機器の応答
- 建屋の応答

入力地震動の相関 (b)
- 地盤中の地震動
- 地震基盤での地震動 (Vs～3000 m/s)



応答の相関の影響

■ JNESは、入力地震動の相関、同一サイトにおける複数の建屋内の機器の応答の相関、マルチユニットにおける損傷の相関の概念及び定量評価手順を確立。

■ これらの内容は、原子力学会地震PRA実施基準、IAEA技術基準に反映。

■ マルチユニット/サイトを考慮した安全目標/性能目標の検討が重要となる。

Ⅳ. 地震・津波等外的事象に対する原子力防災システムTiPEEZ 及び原子力リスクのコミュニケーションの実践

Ⅳ-1 TiPEEZの実践

JNESの活動は、以下の通り。

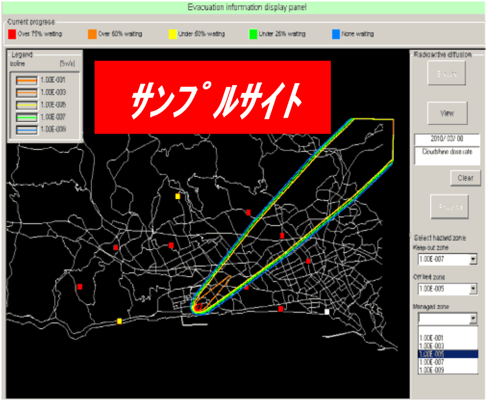
- 安全研究の一環として代表プラントの地震リスクを評価し、周辺住民の避難の可否によって、公衆被ばくのリスクが大きく影響されることを把握した。
- 地震動下での避難がプラント周辺地域の被害状況によって大きく影響されることから、旧原研の「地震情報緊急伝達システム」を導入し、TiPEEZ原型版に反映した。
- 2004年スマトラ沖津波では、インドのマドラス原子力発電所の海水ポンプが津波によって冠水し、機能喪失した。
- 上記を踏まえて、IAEAの津波EBP(特別拠出金事業)(2007～2010)において、TiPEEZのカスタマイズを行い、インドの原子力サイトに適用した。
- 当時の(旧)防災指針には、地震及び津波等外的事象による原子力災害が規定されていなかった。

TiPEEZ:: Protection of NPPs against Tsunami and Post Earthquake consideration in the External Zone

TiPEEZの主な機能　(1/3)

原子力施設ｻﾌﾞｼｽﾃﾑ（サイト内）

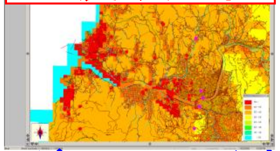
●現地計測データに基づく線量分布推定



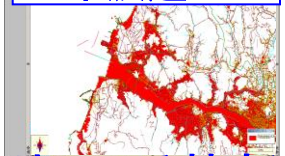
支援機関ｻﾌﾞｼｽﾃﾑ（サイト外）

●ハザード（地震、津波）

地震動分布



津波遡上



●フラジリティ（地震・津波による被害）

橋梁被害

急傾斜地被害

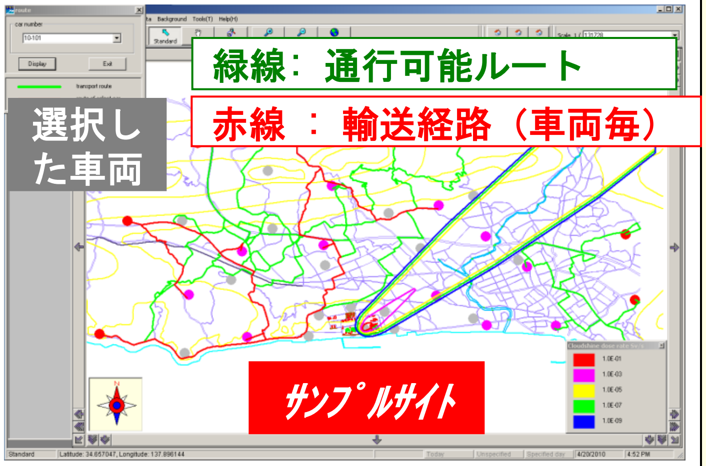
土木技術

●避難ルート推定

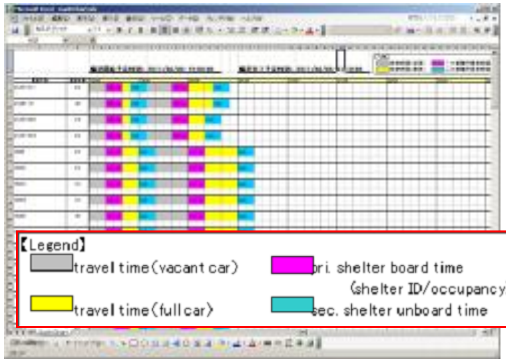
緑線：通行可能ルート

赤線　：輸送経路（車両毎）

選択した車両



●輸送（配車）計画推定
（ガントチャート表示）



【Legend】
travel time(vacant car)
pri. shelter board time (shelter ID/occupancy)
travel time(full car)
sec. shelter unboard time

立地地域自治体、関係機関等

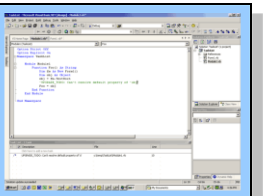
TiPEEZの活用例1（インド:クダンクラムNPP）（2/3）

■成果目標
・適用国（機関）における自律的なカスタマイズと運用のための技術移転

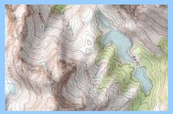
IAEA EBPの成果目標

TiPEEZのインストール

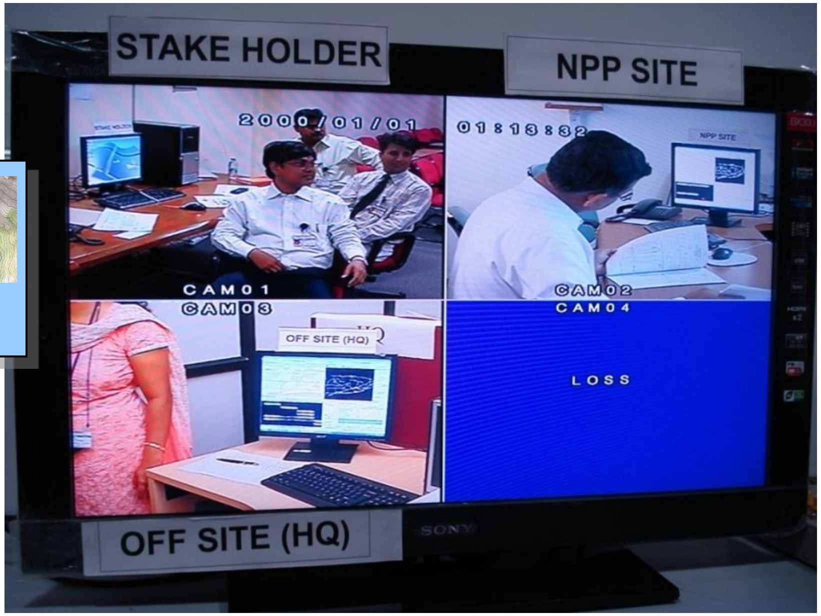
地域特性に応じた推定機能のカスタマイズ



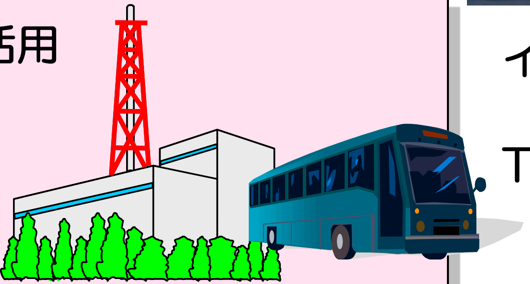
基本データの作成



緊急時（図上）訓練



●適用国（サイト）に応じた活用
- プラント安全対策検討
- 地域防災計画の有効性評価



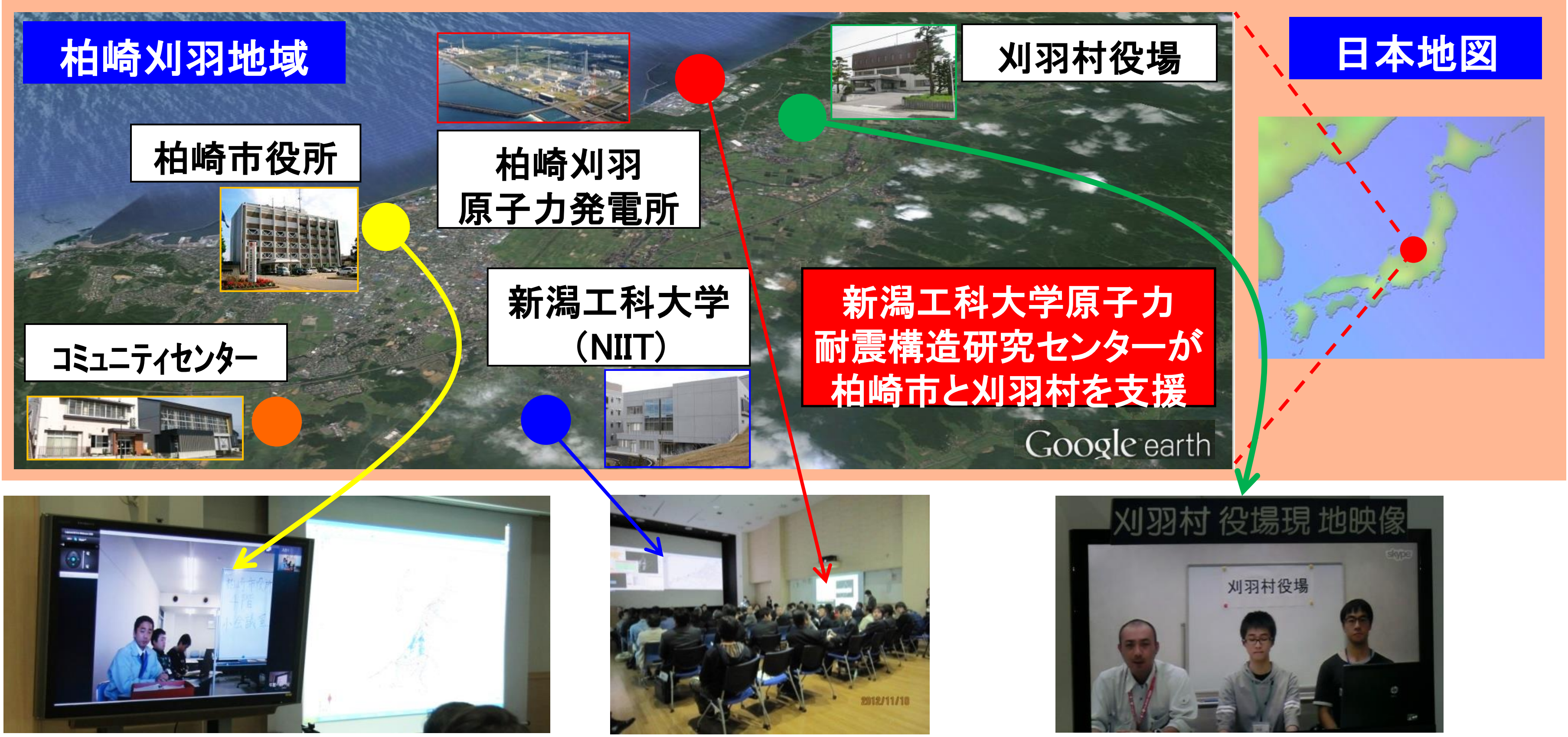
インド・電力公社本社における
IAEA/JNES支援による
TiPEEZを用いた緊急時訓練実施の様子
（2010年2月）

TiPEEZの活用例2（柏崎・刈羽地域における実践）（3/3）

■原子力災害対策指針の要点（抜粋）

- 被災者の視点に立った防災計画の立案
- 定期的な防災訓練の実施と評価結果に基づく防災体制の改善
- 周辺住民等に対する情報伝達等を組み合わせた訓練の実施

■柏崎刈羽地域市民へのデモンストレーション（H24.11，H25.3，H25.8）



柏崎市役所（市職員とNIIT学生）　市民　刈羽村（ラピカ）（村職員とNIIT学生）

Ⅵ−2　柏崎・刈羽地域での原子力リスクコミュニケーションの実践

■原子力リスクコミュニケーションの系譜

- 原子力の専門家の多くは、当初、リスクコミュニケーションの目的を、相手方の意思へ影響を与えることや啓蒙・説得することとしていた。
- 1986年チェルノブイリ事故以降、専門家に対する社会の信頼が大きく損なわれ、啓蒙・説得の目的設定は意味を失った。
- それ以降、市民と専門家が協働作業を進めながら問題解決を図る市民参加型コミュニケーションの方向が、実践されてきた。

■柏崎・刈羽地域における原子力リスクコミュニケーションの実践

- JNES・新潟工大は、柏崎・刈羽市民/メディア/教育機関/自治体（柏崎市、刈羽村）の協力得て、IAEAと連携し、原子力リスクのコミュニケーション研究を実施。

(1) 分かり易さ「柏崎・刈羽モデルレシピ」作成研究の実施

(2) IAEA/JNESは、市民参加型の国際情報伝達に関するワークショップ（2011.12, 新潟工大）を開催。

(3) IAEA「地震・津波等外的事象に対する原子力リスクコミュニケーション基準」に反映中。

分かり易さに関する「柏崎刈羽モデル」の構築 (1/2)

■「柏崎・刈羽モデル」の定義

（1） 専門家と地元市民との乖離に関する情報を収集・分析し、乖離の要因を整理する
（2） 要因整理結果に基づき、分かり易さがどうあるべきかの定式化を進める
（3） 定式化には、（1）、（2）の実施プロセスも明記し、他地域への活用手順も盛り込む
（4） 上記（3）までのプロセスも含めたマニュアルを『柏崎・刈羽モデル』とする

■「柏崎・刈羽モデル」レシピの開発手順

・前提条件： JNES/新潟工大共同研究の一環として、卒論・修論として3年計画で、
柏崎・刈羽地域の自治体・市民等の協力を得て実践

「柏崎・刈羽モデル」レシピの主要項目

送り手 ⇔ 受け手
聞き手

実証試験
（「柏崎・刈羽」地域）

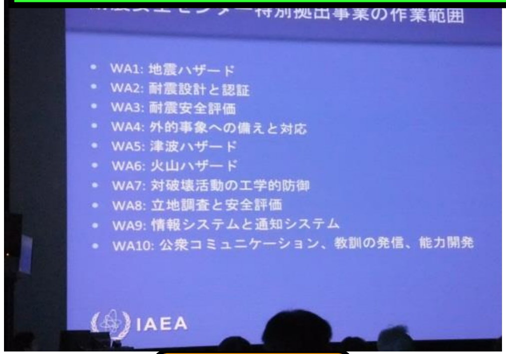
送り手 JNES ⇔ 受け手 地元市民
聞き手 新工大

サポート
みずほ総研

アンケート・面談実施状況

技術説明学： 東京大学

IAEA国際情報伝達ワークショップ（2011.12,新潟工大）（2/2）



IAEA

基調講演

地元市民

地元自治体

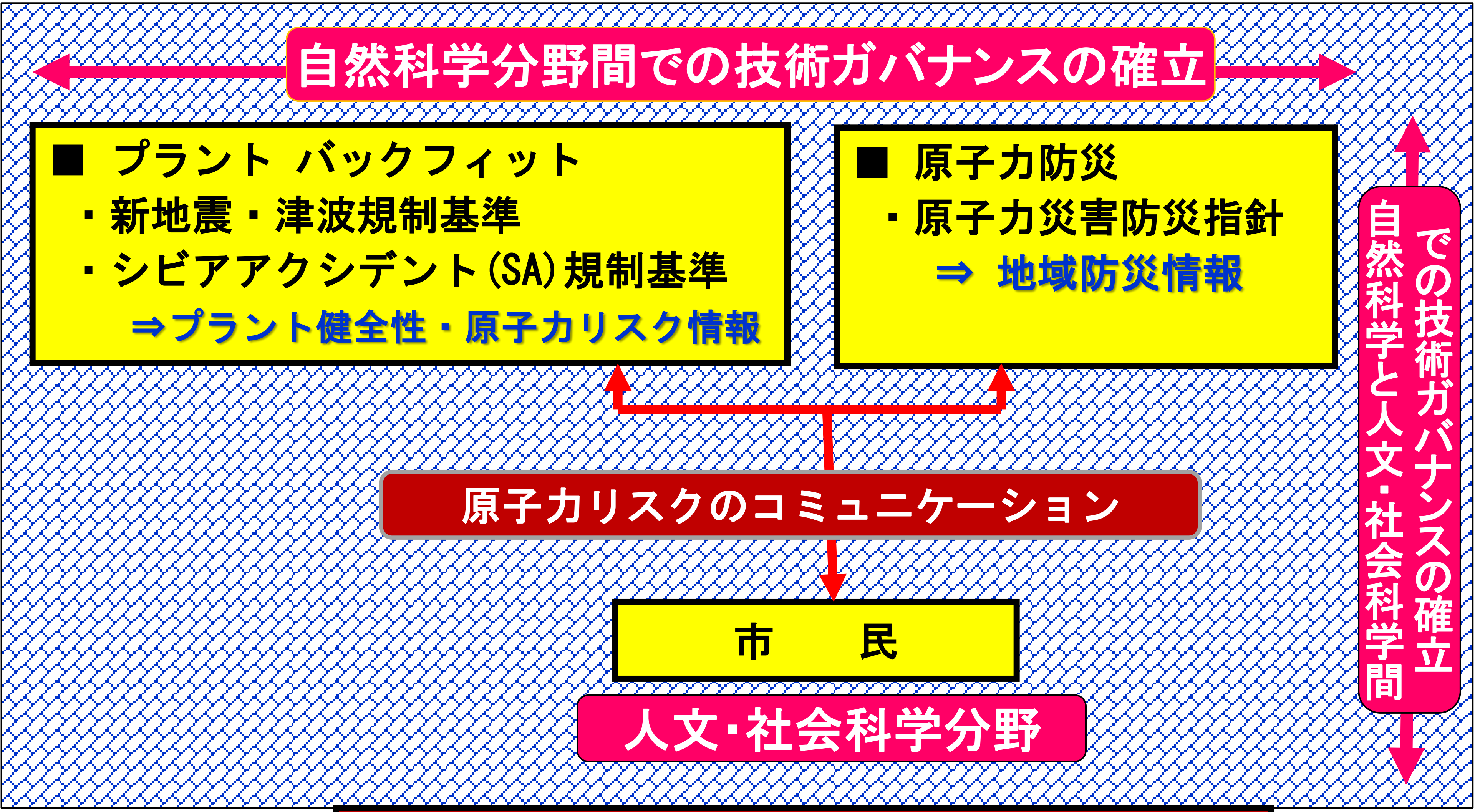
地元メデア

市民・専門家によるパネルディスカッション

WSでは基調講演の内容が合意される

■「今は同意していないという状態であることに同意する（agree to disagree）」の認識が重要
■「不毛の対立を超えて意義のある不一致」の実現が必要

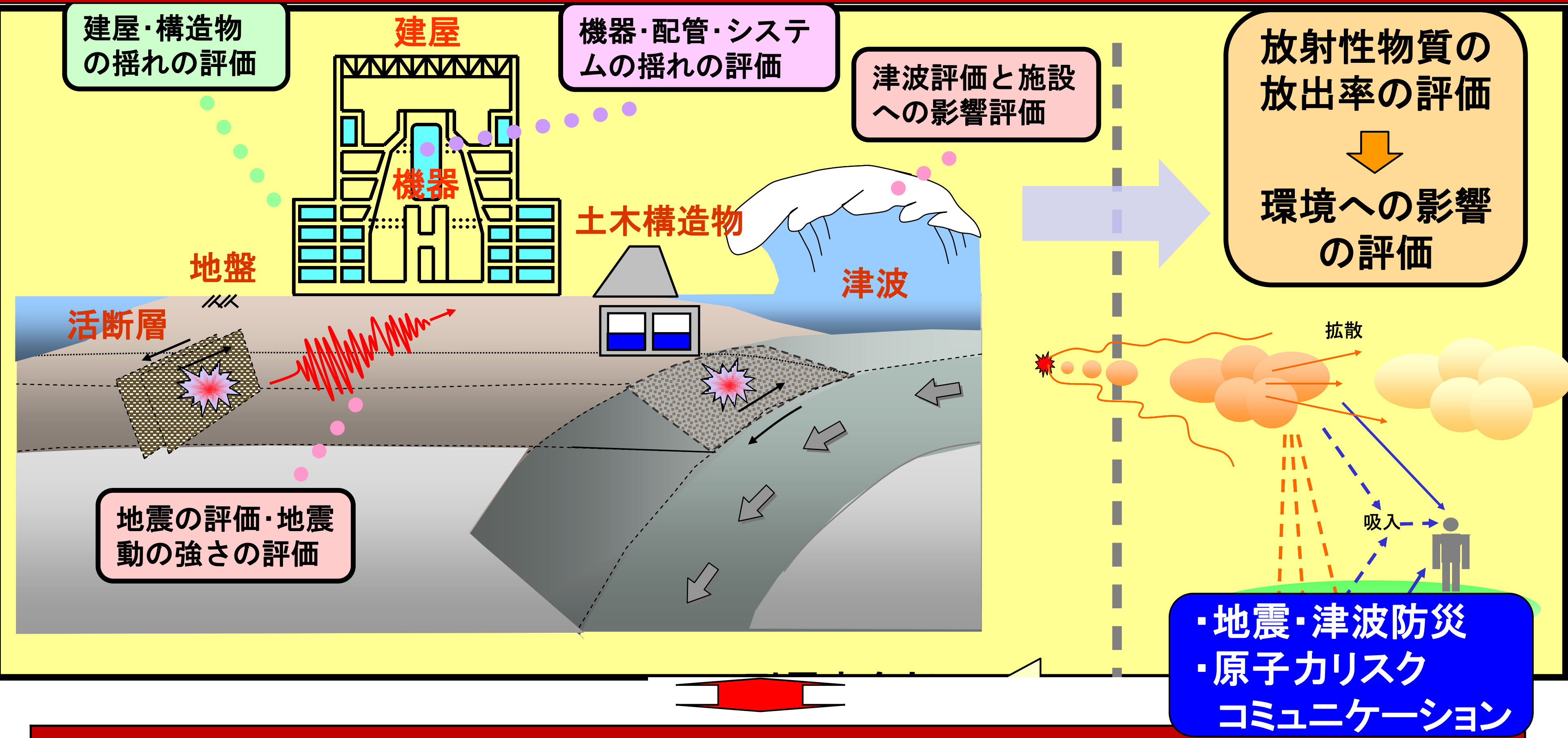
Ⅴ．今後の活動の方向性



■ 自然科学分野と人文･社会科学分野との融合
⇒ 「技術ガバナンス」の重要性の認識及び普及

「技術ガバナンス」を認識し得る人材育成（PRAに立脚）

地震・津波から地盤/建屋/機器/システム/FP/被曝まで一気通貫技術



プラント生涯に亘る対応

1. 立　地	2. 設計	3. リスク評価	4. 建　設	5. 運　転	6. 廃　炉