

【個別報告 1】

原子力発電所の再稼働を支援する 自然災害評価技術

電力中央研究所

原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム
チームリーダー 研究参事 松山 昌史

サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門
兼 原子力リスク研究センター 自然外部事象研究チーム
上席研究員 佐々木 俊法

研究報告会2023
2023年11月16日

電力中央研究所

© CRIEPI 2023

電力中央研究所

本報告でお伝えしたいこと

- 電中研では、長年蓄積してきた自然災害評価・対策に関する現場調査・観測、実験、解析・分析といった基盤技術を基に、科学的根拠に基づいて原子力発電所の再稼働を支援していること
- これらの基盤技術は、再稼働支援にとどまらず、さらなる安全性向上を事業者と共に進めるために、今後も維持・発展させること

© CRIEPI 2023

1

報告内容

1. 原子力発電所における自然災害評価技術

- 福島第一原子力発電所事故の教訓
- 事故の教訓を踏まえた新規制基準の概要
- 再稼働に係る科学的評価の取り組み
 - 断層活動性、地震動、津波、竜巻、火山



2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

報告内容

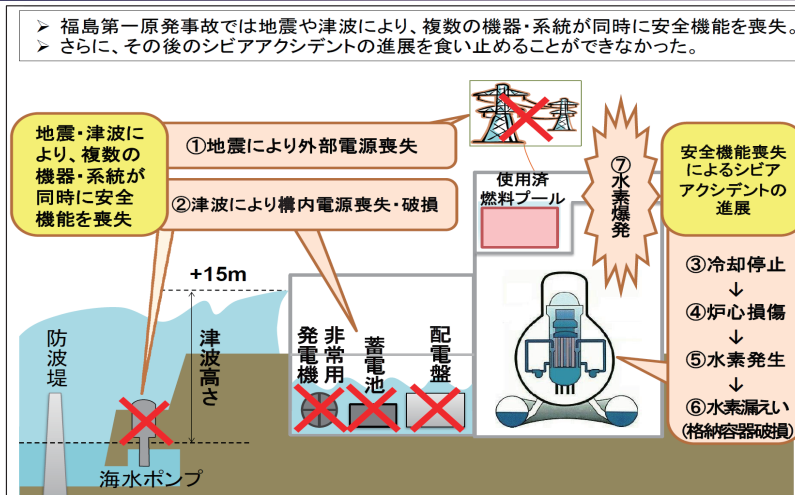
1. 原子力発電所における自然災害評価技術

- 福島第一原子力発電所事故の教訓
- 事故の教訓を踏まえた新規制基準の概要
- 再稼働に係る科学的評価の取り組み
 - 断層活動性、地震動、津波、竜巻、火山



2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

福島第一原子力発電所事故の教訓

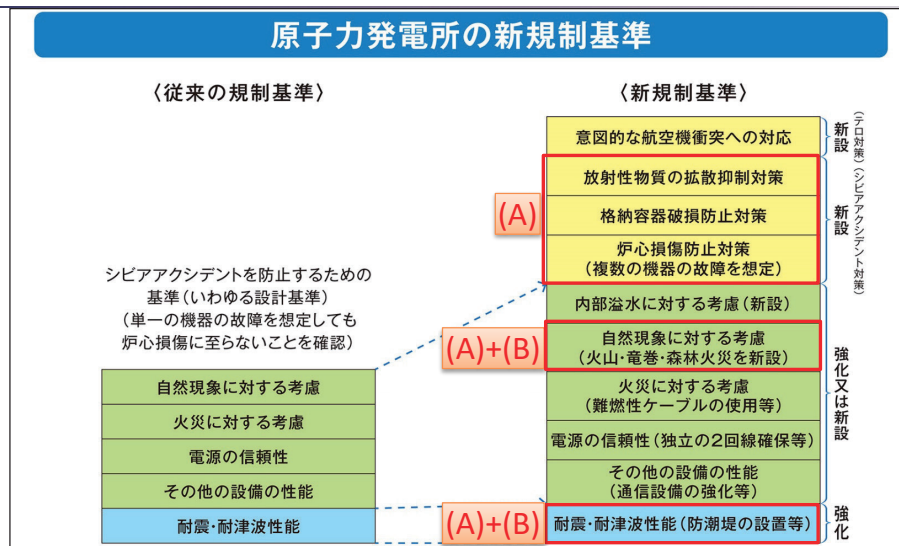


実用発電用原子炉に係る新規制基準について(2016)の図を一部修正

地震と津波による全電源喪失が原因

- (A)設計基準を超えるような自然災害が生じたときへの備え
- (B)考慮すべき自然災害規模の増大に伴う設計基準の強化

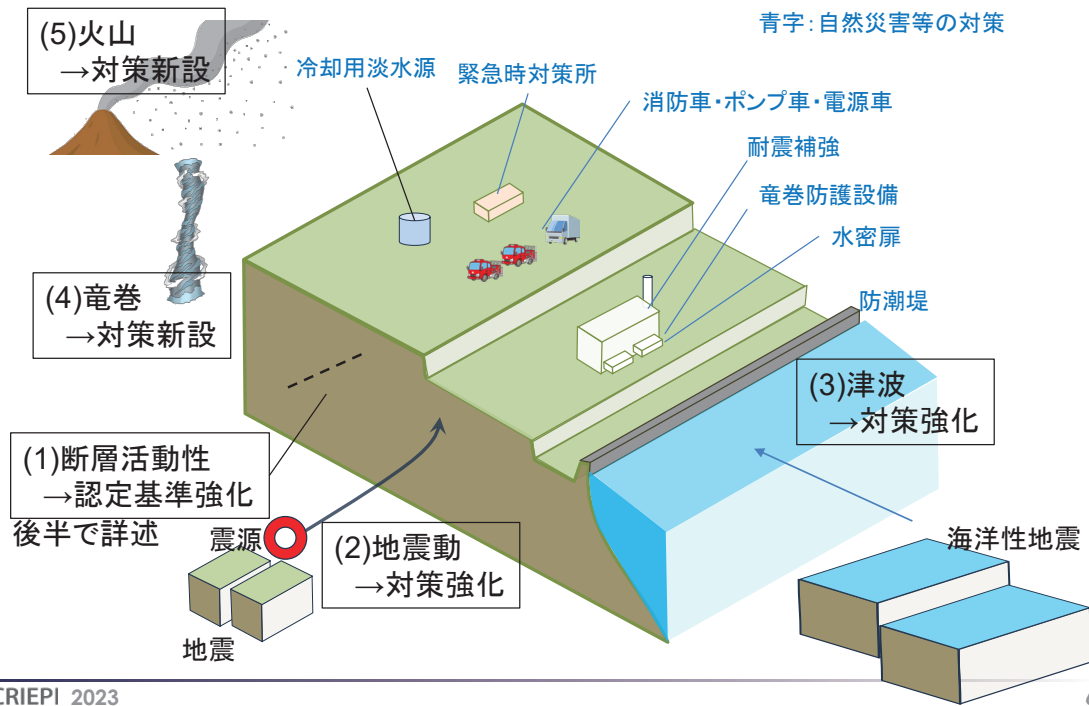
事故の教訓を踏まえた新規制基準の概要



実用発電用原子炉に係る新規制基準について(2016)の図を一部修正

- (A)設計基準を超えるような自然災害が生じたときへの備え
- (B)考慮すべき自然災害規模の増大に伴う設計基準の強化

安全性評価・対策の対象となる自然災害



再稼働に係る科学的評価の取り組み：地震動(1/2)

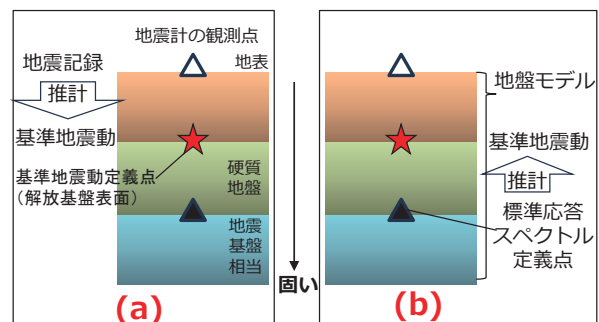
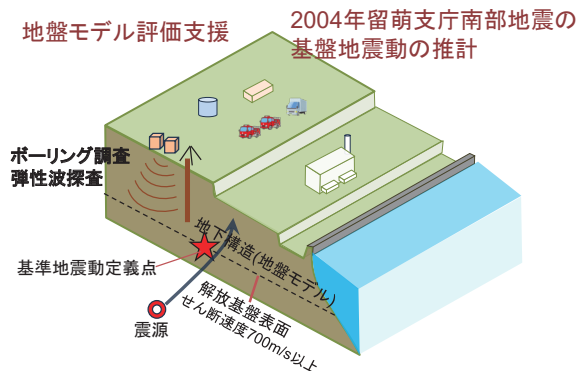
◆規制要求：(B)設計基準強化

- ▶ 安全性確保の基準となる地震動（基準地震動）は「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、水平・鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定し、耐震重要施設的安全機能を損なうおそれがないことを要求

◆評価のポイント

震源を特定せず策定する地震動

- ▶ 震源と活断層の関連づけが困難な過去の内陸地殻内の地震の記録の収集・分析（審査ガイド*、2013）
 - 地震動記録に含まれる観測点固有の影響評価と解放基盤面相当（基準地震動定義点）の記録への調整→(a)
- ▶ 2021年に導入された標準応答スペクトルによる基準地震動策定において、地盤モデルの精緻化が必要→(b)



再稼働に係る科学的評価の取り組み：地震動(2/2)

◆当所の取り組み

➢ 審査ガイド（2013）に例示された全国一律に考慮すべき地震のうち、最も影響の大きい2004年留萌支庁南部地震のK-NET港町での現地調査と基盤地震動の推計を実施→(a)

■ 2021年の審査ガイドの改正において、代表的な地震動として取り扱われる。

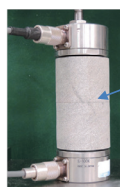
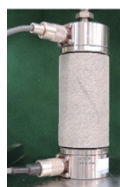
➢ 標準応答スペクトル導入に伴う地盤モデルの精緻化のため、岩石コアによる地盤減衰評価法を確立→(b)



K-NET港町の地震観測所

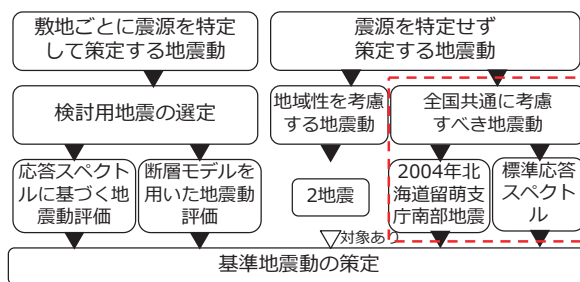


ボーリング調査



亀裂の有無による地盤減衰の評価実験

人工的に亀裂



審査ガイド改正(2021)による基準地震動の策定フロー
赤枠が本報告で示した取り組み(佐藤(2022)を基に作成)

再稼働に係る科学的評価の取り組み：津波

◆規制要求：(B)設計基準強化

➢ 津波防護が必要な施設に大きな影響を及ぼす恐れのある津波(基準津波)に対して、安全機能が損なわれるおそれのないことを要求

◆評価のポイント

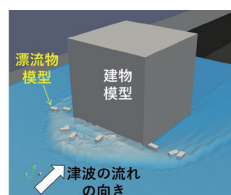
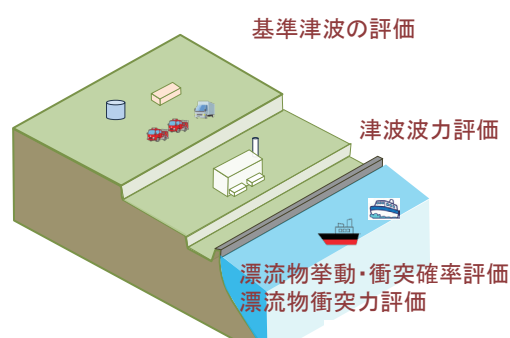
➢ 基準津波策定において、国内外の地震及び火山の山体崩壊や地すべりなどによる津波事例を踏まえて検討

➢ 基準津波に対して、防護施設の設置などにより安全上重要な施設の設置位置に津波を侵入させないことを基本

◆当所の取り組み

➢ 基準津波策定における考え方や不確かさの考慮方法の確立

➢ 津波の波力や漂流物衝突による防護施設への影響に関する評価法の確立



津波漂流物の建物への衝突を再現した数値解析



津波漂流物(車両)の衝突を再現した実物大模型実験

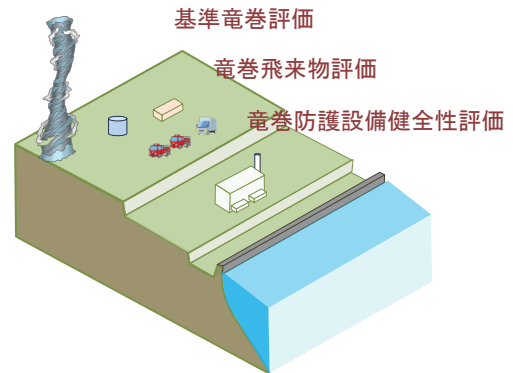
再稼働に係る科学的評価の取り組み：竜巻(1/2)

◆規制要求：(B)設計基準強化

- 竜巻防護が必要な施設に大きな影響を及ぼす恐れのある竜巻(基準竜巻)に対して、安全機能が損なわれるおそれのないことを要求

◆評価のポイント

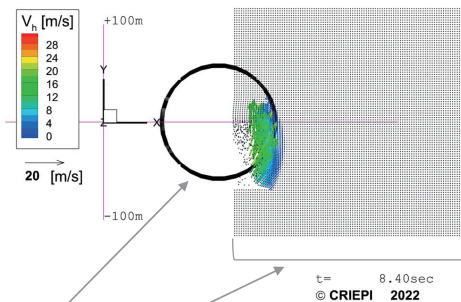
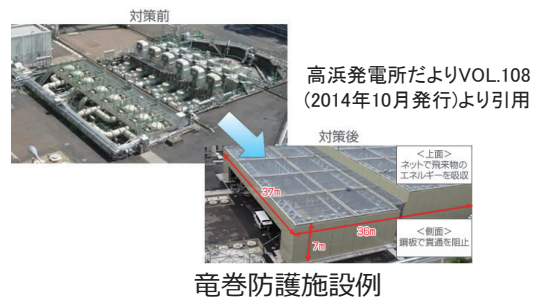
- 基準竜巻の設定
 - 最大風速は下記の内大きな風速を採用
 - 過去に発生した竜巻の最大風速
 - 竜巻風速ハザード曲線の年超過確率 10^{-5} に相当する風速
- 基準竜巻による設計竜巻及び設計荷重の評価
 - 設計荷重として飛来物衝突荷重評価が必要
 - 飛来物衝突荷重に対して竜巻防護施設の構造健全性等が維持されることを確認



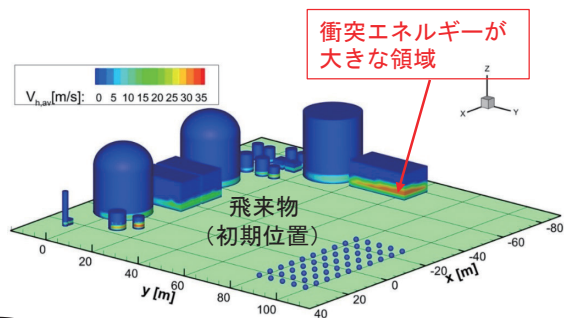
再稼働に係る科学的評価の取り組み：竜巻(2/2)

◆ 当所の取り組み

- 竜巻ハザード曲線策定、基準竜巻の設定方法
- 竜巻飛来物数値解析による影響評価(江口、2021)
- 竜巻防護施設の設計方法及び健全性の確認(南波、2019)



竜巻(左から右に移動する黒円)の通過に伴う物体(右側にある多数の黒丸)の飛散挙動



飛来物衝突時の平均飛来物水平速度

再稼働に係る科学的評価の取り組み：火山

◆規制要求：(B)設計基準強化

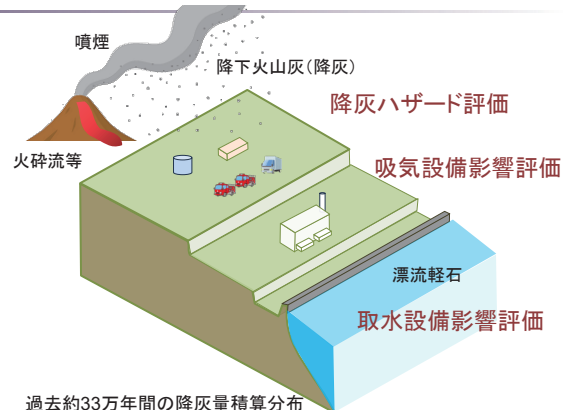
- ▶設計対応不可能な火砕流等の火山事象の到達可能性が十分に小さいこと（立地評価）、加えて降灰等による設備影響評価（影響評価）をそれぞれ要求

◆評価のポイント

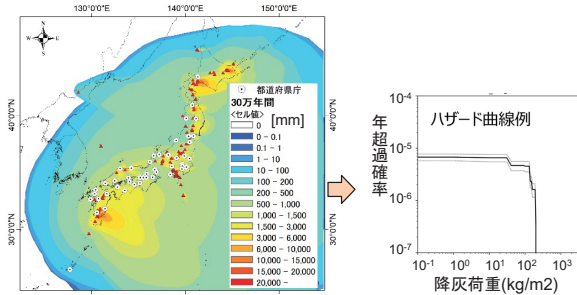
- ▶降灰評価、降灰等による設備影響評価とも実績が少なく、蓄積が必要
- ▶多様な火山事象に関し、新知見への対応や文献資料の網羅性が必要

◆当所の取り組み

- ▶地質調査により降灰、漂流軽石等の発生履歴を解明
- ▶降灰データベースを構築し、降灰層厚ハザード曲線策定技術
- ▶数値解析による噴煙拡散・降灰現象の定量評価技術
- ▶非常用電源等の吸気設備に対する粒子吸引量評価技術



過去約33万年間の降灰量積算分布

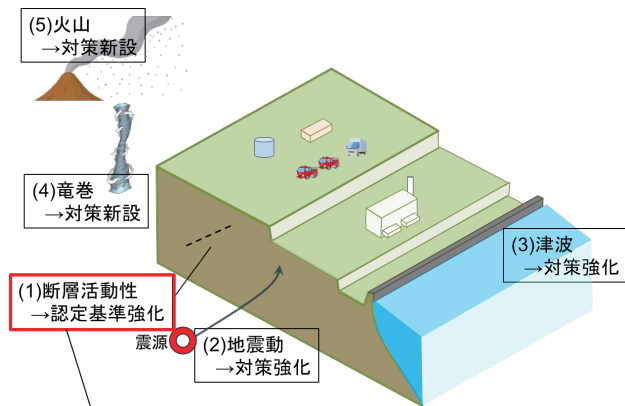


原子力発電所における自然災害評価技術

◆まとめ

- ▶蓄積してきた自然災害評価・対策に関する基盤技術を基に、科学的根拠に基づいて原子力発電所の再稼働を支援
 - 現地調査・観測
 - 実験検証
 - 各種解析・分析
- ▶さらなる安全性向上を事業者と共に進めるため、これらの基盤技術を高度化し、リスク評価技術の構築へ

個別報告(2)で説明



断層活動性評価の詳細を続けて報告

報告内容

1. 原子力発電所における自然災害評価技術

- 福島第一原子力発電所事故の教訓
- 事故の教訓を踏まえた新規規制基準の概要
- 再稼働に係る科学的評価の取り組み

■ 断層活動性、地震動、津波、竜巻、火山



2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

2. 原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

原子力発電所の断層活動性評価手法の高精度化

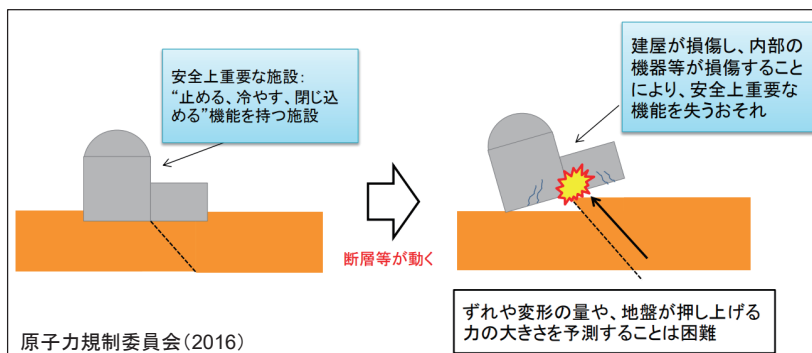


2011年福島県浜通りの地震 (M7) に伴う地表地震断層 (湯ノ岳断層) の出現

背景 2013年に始まった原子力規制委員会の新規規制基準適合性審査においては、耐震重要構造物直下の断層が活断層ではないことを明確に示すことが要求されるようになった。

目的 12.5万年前より古い上載地層の認定の高精度化および断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立が急務となった。

手法 ①精度の高い堆積物の年代推定 (上載地層法)
②最新鋭の装置群を用いた断層活動性分析フローの確立 (鉱物脈法)



原子力規制委員会 (2016)

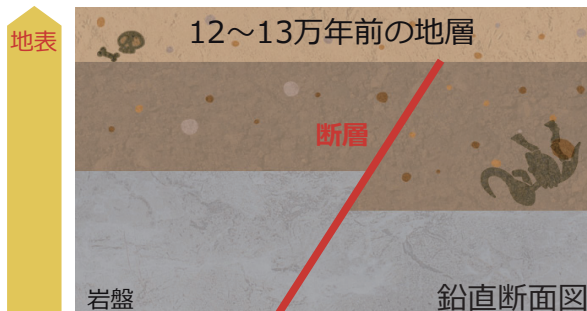
断層活動性評価の基本となる手法（上載地層法）

原子力発電所において耐震設計上考慮する活断層

後期更新世（約12～13万年前）以降の活動性が否定できない断層

断層上載地層法（緒方・本荘，1981）

活断層ではないことを証明できるケース



トレンチ調査の例

1945年三河地震時に活動した深溝断層トレンチ調査



ただし、12～13万年前の地層がない場合には、岩盤内の断層破碎帯の性状等により、活断層かどうかを評価しなければならない。

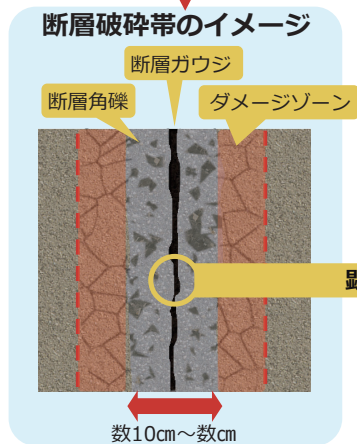
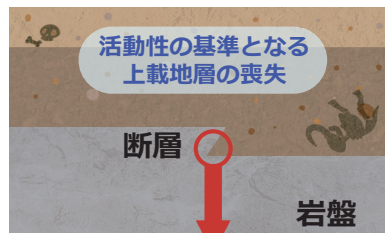
評価手法の開発が必要【例：鉱物脈法】

上載地層法の適用例（大飯）



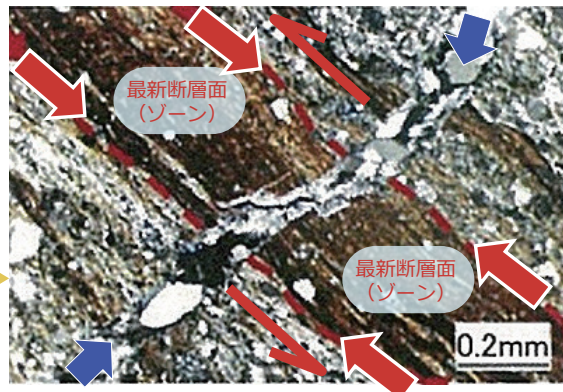
断層の破碎部性状に基づく活動性評価手法（鉱物脈法）

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-



最新断層面を横断する鉱物脈
・断層による変位・変形を被っていない。
・約300万年前に形成

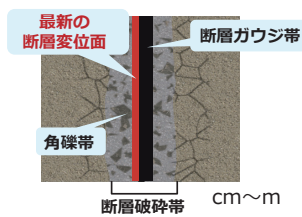
約300万年前以降、断層は活動していない。
活断層ではない。



顕微鏡写真は九州電力川内原子力発電所「原子力規制委員会第107回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会（平成26年4月23日）資料」

鉱物脈法のための断層活動性評価フロー

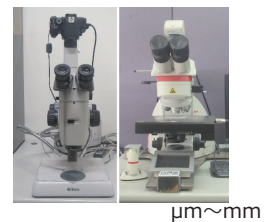
①断層破碎帯の観察・試料採取



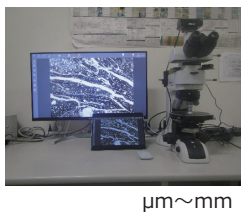
②ヘリカルX線CTを用いて最新断層面を3次元的に認定



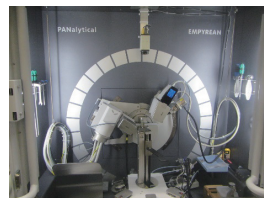
③実体顕微鏡、レーザー顕微鏡による断層のすべり方向、断層型の認定



④偏光顕微鏡による最新断層面沿いの鉱物の種類と破壊・変形構造を観察



⑤X線回折分析装置により最新断層面沿いの鉱物を詳細に認定



⑥マイクロフォーカスX線CTによる最新断層面沿いの3次元変形構造の詳細観察



⑦電子顕微鏡により最新断層面沿いの鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定

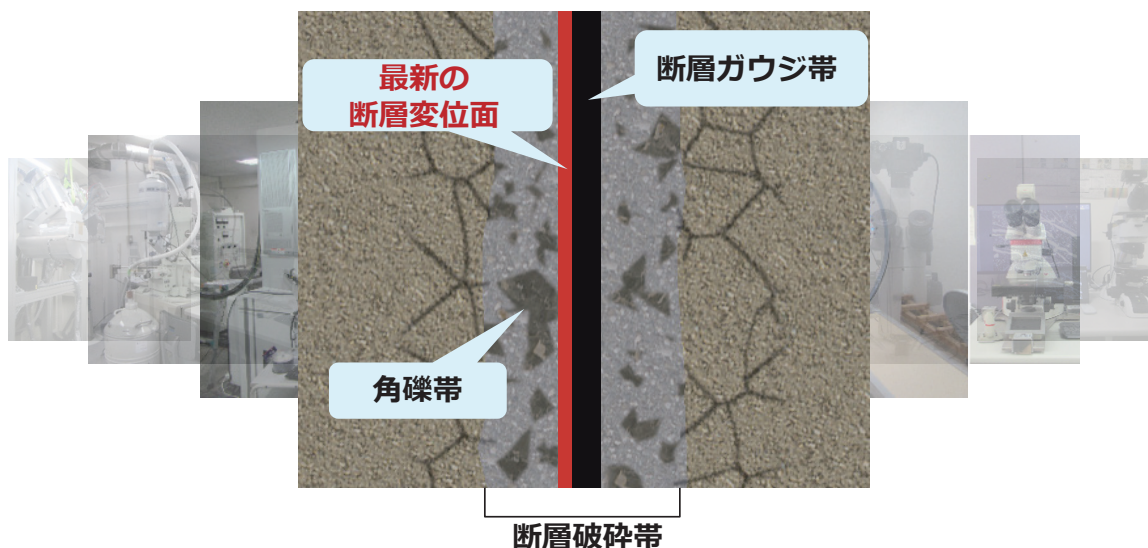


断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

① 断層破砕帯の観察・試料採取

10^{-2} ~ 10^0 スケール
(センチメートル~メートル)



断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

② ヘリカルX線CTを用いて最新断層面を3次元的に認定

10^{-6} ~ 10^{-2} スケール (マイクロメートル~センチメートル)

最大撮影領域径 : 50cm

空間分解能 : 0.15mm

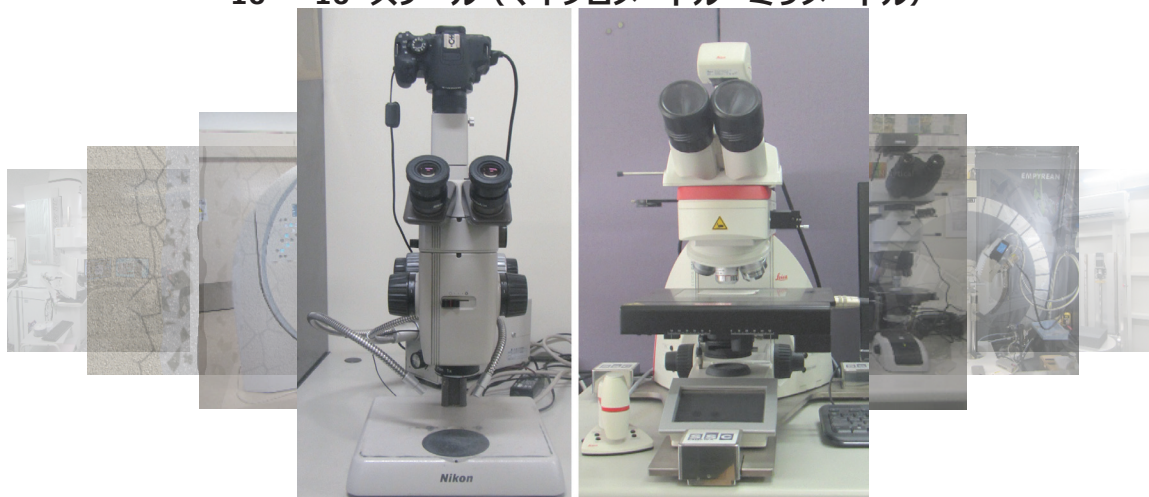


断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

③ 実体顕微鏡，レーザー顕微鏡による 断層のすべり方向、断層型の認定

10⁻⁶~10⁻³スケール（マイクロメートル～ミリメートル）

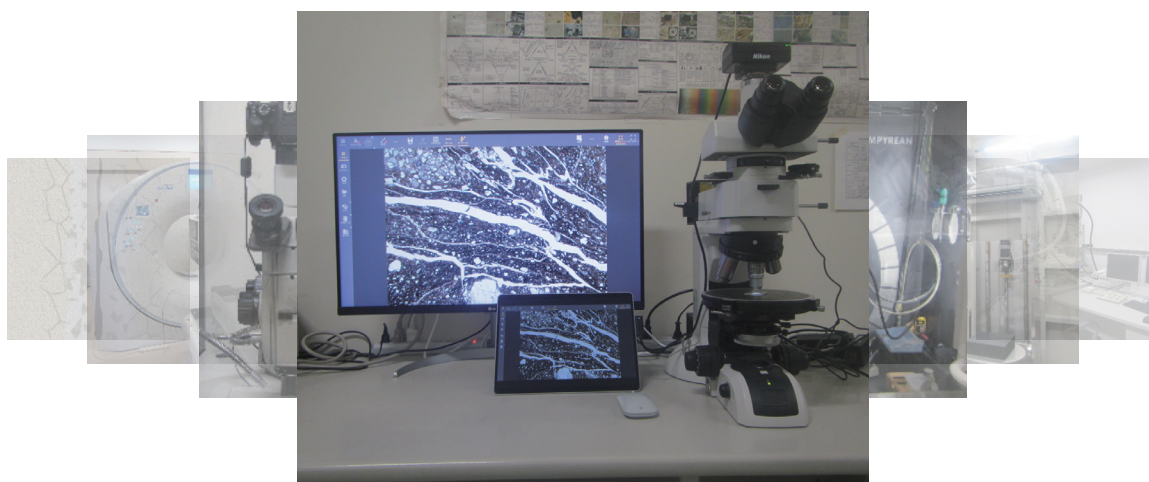


断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

④ 偏光顕微鏡による最新断層面沿いの 鉱物の種類と破壊・変形構造を観察

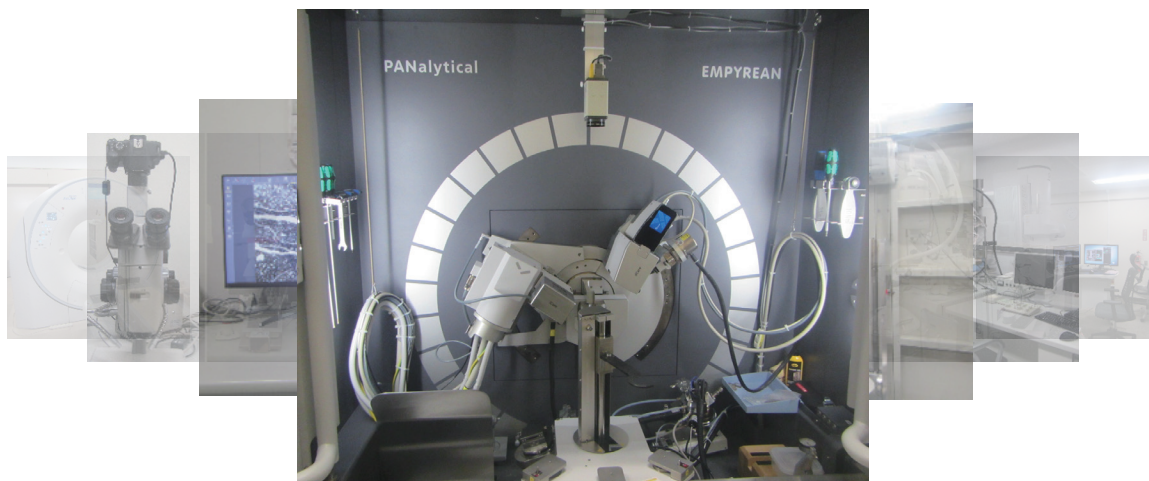
10⁻⁶~10⁻³スケール（マイクロメートル～ミリメートル）



断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

⑤ X線回折分析装置により 最新断層面沿いの鉱物を詳細に認定



断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

⑥ マイクロフォーカスX線CTによる 最新断層面沿いの3次元変形構造の詳細観察 10⁻⁶~10⁻³スケール (マイクロメートル~ミリメートル)

空間分解能 : 60 μ m



最大撮影領域径 : 61mm

断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

- ⑦ **電子顕微鏡により最新断層面沿いの**
鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定
10⁻⁹~10⁻⁶スケール (ナノメートル~マイクロメートル)



走査型電子顕微鏡

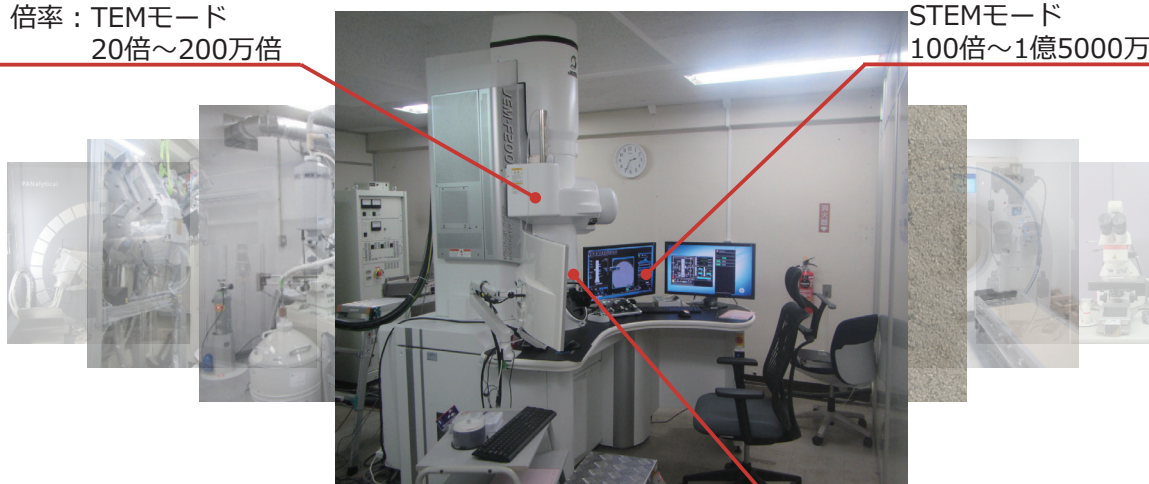
断層の破砕部性状に基づく活動性評価手法の確立

-電中研所有の装置群を用いた分析フローの確立-

- ⑦ **電子顕微鏡により最新断層面沿いの**
鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定
10⁻⁹~10⁻⁶スケール (ナノメートル~マイクロメートル)

倍率：TEMモード
20倍~200万倍

STEMモード
100倍~1億5000万倍

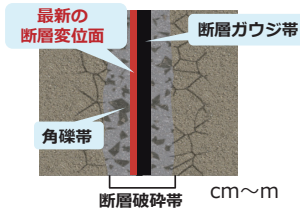


透過型電子顕微鏡

最大視野径：2mm

これらの装置が電中研の我孫子地区に集約→緊急的な課題に対応可能

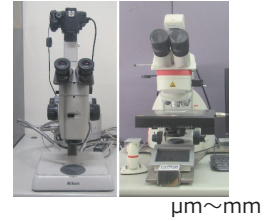
①断層破砕帯の観察・試料採取



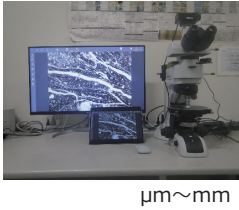
②ヘリカルX線CTを用いて最新断層面を3次的に認定



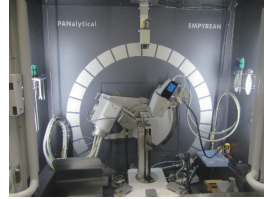
③実体顕微鏡、レーザー顕微鏡による断層のすべり方向、断層型の認定



④偏光顕微鏡による最新断層面沿いの鉱物の種類と破壊・変形構造を観察



⑤X線回折分析装置により最新断層面沿いの鉱物を詳細に認定



⑥マイクロフォーカスX線CTによる最新断層面沿いの3次元変形構造の詳細観察



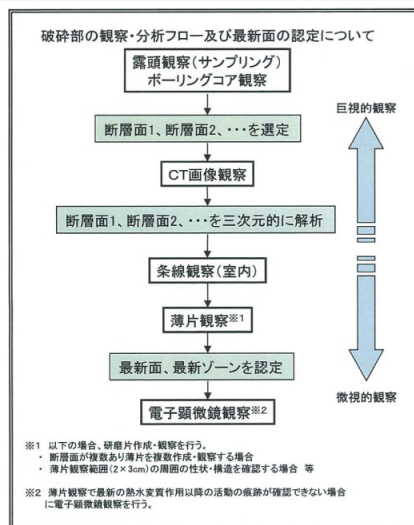
⑦電子顕微鏡により最新断層面沿いの鉱物の破壊・変形の有無を詳細に認定



電中研の分析装置群を用いた断層活動性分析フロー

-関西電力美浜発電所への適用事例-

各原子力発電所の断層活動性評価に関する新規制基準適合性審査において、これまで示した分析装置群を用いた断層活動性分析フローが適用されてきた(例:左下図)。また、この分析フローに従って各装置で分析した結果は、敷地の断層群が活断層ではないことを示していた。



原子力規制委員会
第3回美浜発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合(平成27年3月2日)
関西電力資料

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000098834.pdf>

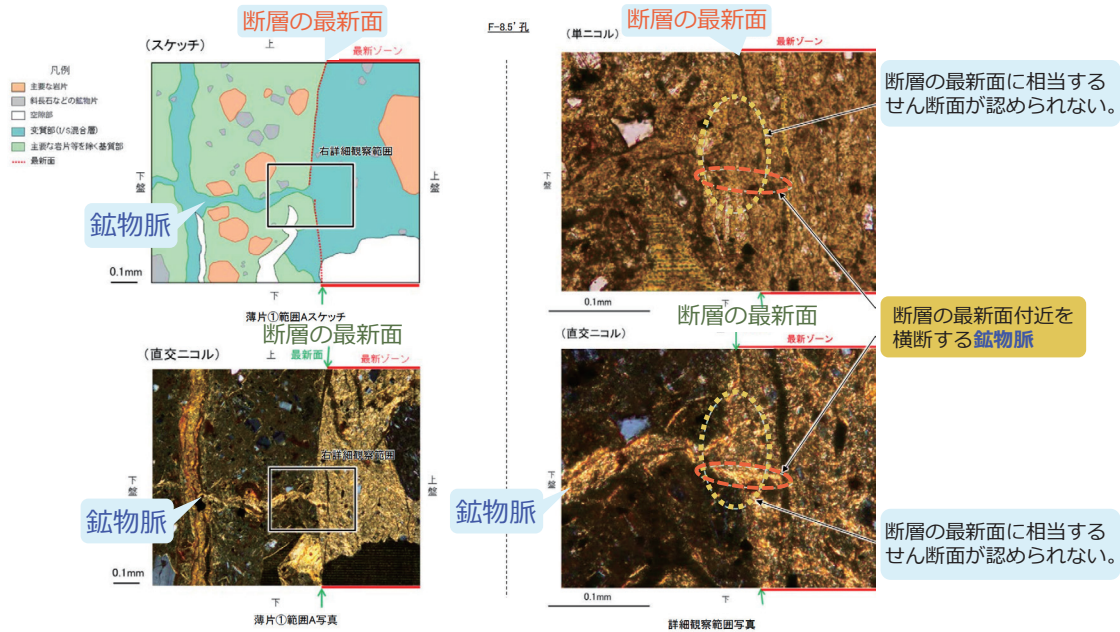
P.2



断層破碎部試料の顕微鏡観察（鉱物脈法）

-北陸電力志賀原子力発電所への適用事例-

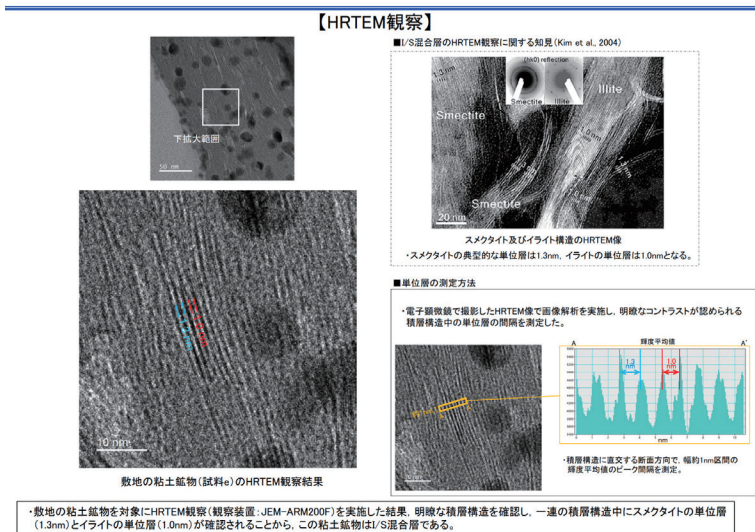
鉱物脈が断層の最新面を横断している → 鉱物脈が形成されて以降、断層は活動していない



原子力規制委員会第1121回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（2023年3月3日）北陸電力資料

断層破碎部試料の高分解能電子顕微鏡観察（鉱物脈法）

-北陸電力志賀原子力発電所への適用事例-



一般地粘土鉱物を対象にHRTEM観察(観察装置:JEM-ARM200F)を実施した結果、明瞭な積層構造を確認し、一連の積層構造中にスメクタイトの単位層(1.3nm)とイライトの単位層(1.0nm)が確認されることから、この粘土鉱物はI/S混合層である。

上記は、東京大学小基研究室、電力中央研究所、北陸電力による観察結果である。

原子力規制委員会第875回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(2020年7月10日)北陸電力資料

鉱物脈（イライト-スメクタイト混合層）は約12～13万年前より古い時代に形成された。

敷地内断層は活断層ではない。

「鉱物脈ができて以降、(断層が)動いていないという証拠が出てきた。大きな進展だ。」



規制委員

断層活動性評価（まとめ）

- 敷地内断層の活動性評価手法として「**上載地層法**」と「**鉱物脈法**」を取り上げ、**様々な専門分野の知見**を総動員した地層の年代評価や**系統化された分析装置群**による手法の高度化について解説するとともに、具体的に原子力発電所再稼働審査に適用された事例について紹介した。
- その他、「**新たな地質年代測定技術**」など分析技術の開発、「**断層摩擦実験**」や「**断層変位に着目した模型実験**」などの実験研究があり、これらを今後も積極的に進め、多角的・総合的に断層研究を推進していく。
- これら一連の断層研究によって得られた科学的知見や開発された高度な技術は、**水力地点（海外を含む）**や**高レベル放射性廃棄物処分場**などの断層評価に役立てていく。

ご清聴ありがとうございました

RI 電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry



参考文献

1. 実用発電用原子炉に係る新規規制基準について、原子力規制委員会、2016。
(<https://www.nra.go.jp/activity/regulation/tekigousei.html>)
2. 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド、原子力規制委員会、2013。
(<https://www.nra.go.jp/data/000069160.pdf>)
3. 基準地震動等審査ガイドの改正案について、原子力規制委員会、2021。
(<https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kisei/010000713.html>)
4. 「震源を特定せず策定する地震動」の考え方と審査ガイドの改正、佐藤浩章、日本原子力学会誌ATOMOS/64 巻 8 号、2022。(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/64/8/64_454/_article/-char/ja/)
5. 確率論的強風飛来物解析コードTONBOS-proの開発、江口譲、電中研報告、NR21004、2021。
6. 竜巻飛来物衝突を受ける鋼板の耐貫通性能に関する研究－BRL式の適用性に関する基礎検討－、南波宏介、電中研報告、O19003、2019。
7. 実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について、原子力規制委員会、2016。(2016、2017、2018、2022改定)
(<https://www.nra.go.jp/data/000155788.pdf>)
8. 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価、緒方 正彦、本荘 静光、応用地質、22 巻、1 号、1981。
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjseg1960/22/1/22_1_67/_article/-char/ja/)
9. 美浜・現調 4－1 美浜発電所敷地内破碎帯の追加調査コメント回答、関西電力、第3回美浜原子力発電所敷地内破碎帯の調査に関する有識者会合資料(平成27年3月2日)、原子力規制委員会、2015。
(<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000098834.pdf>)
10. 志賀原子力発電所2号炉 敷地の地質・地質構造について、北陸電力、第1121回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(2023年3月3日)、原子力規制委員会、2023。(https://www2.nra.go.jp/disclosure/committee/youshikikya/tekigousei/power_plants/200000453.html)