

解説 記事

原子力発電所の敷地内破碎帯問題： 志賀原子力発電所の敷地内シームの評価（その1）

北陸電力株式会社 片川 秀基 Katagawa HIDEKI
北陸電力株式会社 中嶋 光浩 Nakashima MITSUHIRO

1. はじめに

原子力発電所では、活断層の上に重要構造物を作らない。そのため既設発電所では、現地確認を含む厳重な安全審査で、その旨の確認がなされてきた。

北陸電力(株)は、2012年7月18日の原子力安全・保安院（当時）の指示により、志賀原子力発電所において、シームの断層活動性の追加調査を実施した。この調査等の結果は、2013年12月19日原子力規制委員会（2012年9月に発足。）に報告し、同委員会の下で有識者による評価会合（以下、有識者会合と呼ぶ。）に付されている。この解説記事の執筆時点で、有識者会合の評価書はまだ確定していない。

この解説記事では、シーム問題の背景、発端と経緯、追加調査の内容と結果、2015年11月20日のピア・レビューで審議された評価書案[1]の問題点について（その1）、（その2）の2編で解説する。

（その1）では、まず「2. シーム問題の発端」として原子力発電所の敷地内破碎帯問題の背景、北陸電力(株)の志賀原子力発電所のシームが活動性を問われるにいたった発端について述べる。次に「3. シーム問題への取り組み」として原子力規制委員会下で改訂された新規制基準とその適用を概略し、調査・評価への取り組み方について述べる。「4. シームとは何か？」および「5. シーム S-1 の断層部分の活動時期」については北陸電力(株)の追加調査結果等から述べる。

2. シーム問題の発端

2.1 原子力発電所の敷地内破碎帯問題

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による広範な地殻変動に伴って誘発地震活動が頻発した。2011年4月11日の福島県浜通りの地震（M7）では、耐震設計で考慮されていなかった湯ノ岳断層に地表地震断層が出

現した。これを踏まえ原子力安全・保安院（当時）は2012年4月以降、耐震バックチェックの一環として既設原子力発電所の敷地内破碎帯の活動性をレビューし、評価資料の充実を目的に、志賀原子力発電所を含む6つの原子力発電所に追加調査を指示した。

2.2 志賀原子力発電所のシーム問題の発端

「シーム」という用語は、成因の如何によらず粘土等の挟み層に用いられる。志賀原子力発電所では、基礎岩盤中の地質不連続面に節理、シーム、破碎帯の3区分を行った。節理は挟在物がなく連続性に乏しい所謂通割れ目、シームは薄い粘土質の挟み層、破碎帯は砕けた岩石からなり粘土を伴う。

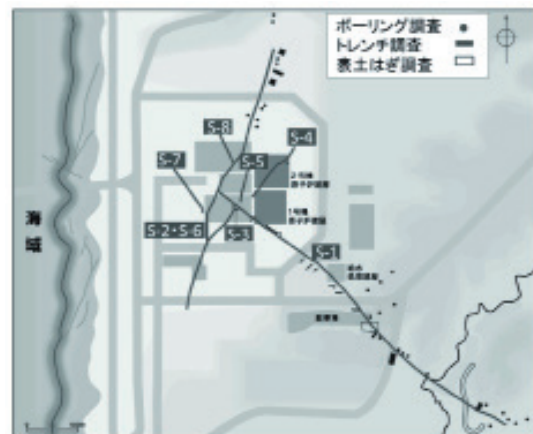


図1 志賀原子力発電所のシーム等の分布

志賀原子力発電所の基礎地盤に破碎帯は存在しない。基盤（千数百万年前の安山岩の火山活動でできた岩石からなる穴水累層）中に S-1 ～ S-8 の 8 本のシームがあり（図1）、中位段丘 I 面（12 ～ 13 万年前）など海成段丘堆積層に覆われる [2]。シームには北西 - 南東方向と北北東 - 南南西方向があり、いずれも傾斜は高角度である。北陸電力(株)はそれぞれの方向を代表するシーム S-1、及

びS-4とS-6でトレンチ調査等を実施し、中位段丘I面を構成する堆積層（少なくとも12～13万年前以前）に変位がないことを明らかにした。なお、シームS-2とシームS-6はそれぞれの延長に位置して近接し、走向傾斜、条線の方向も同じなので、一括してシームS-2・S-6として扱う。

こうしたシームが敷地内破砕帯問題の対象となったのは、2012年7月17日の原子力安全・保安院（当時）「地震・津波に関する意見聴取会」においてである。安全審査当時のシームS-1トレンチ（以下、旧トレンチと呼ぶ）の壁面スケッチ（図2）について、堆積層基底面のシームS-1の位置に段差があることから、一部委員が堆積層の断層変位を疑ったのである。

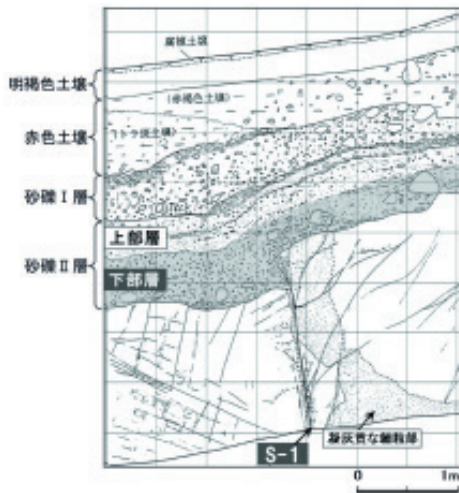


図2 旧トレンチ（Bトレンチ北西壁）スケッチ

これを受けて原子力安全・保安院（当時）は、翌18日、北陸電力(株)に追加調査を指示した[3]。北陸電力(株)は直ちに調査計画を策定し、同年8月、原子力安全・保安院（当時）の承認を得て追加調査に着手した。

2.3 シームの追加調査開始以降

原子力安全・保安院（当時）と原子力安全委員会（当時）とのダブルチェック体制による安全規制は、2012年9月、原子力規制庁を事務局とする原子力規制委員会に一元化された。

原子力発電所の敷地内破砕帯問題は原子力規制委員会に引き継がれ、追加調査結果に基づく評価作業は、同委員会の下、有識者会合で行われることになった。有識者会合とは16名の有識者のなかから原子力発電所毎に4名が選任され、原子力規制庁を事務局として評価作業にあたる。

有識者会合の評価書案は、担当以外の有識者によるピア・レビューを経て、評価書として確定する。ピア・レビューは学术论文の査読にあたる。日本原電(株)敦賀原子力発電所ではレビューアから問題点の指摘が多出したことから、座長は、評価書は科学的合理性に基づく総合的評価として整理すべき旨を述べている。しかし、評価書の結論が見直されることはなかった。

2015年11月20日、北陸電力(株)の志賀原子力発電所のピア・レビューが行われ、レビューアから、評価書案に用いられた根拠の妥当性やデータに対する事実認識について意見が多出した。これを踏まえ本年1月6日の原子力規制委員会第48回定例会は、有識者間で評価が分かれる部分があれば『その旨を明記したうえで評価書を取りまとめていく。』とした[4]。しかし、これを受けて実施された3月3日の有識者会合でレビューアの意見は顧慮されず、評価書案の結論は変わっていない[5]。

なお、現在、有識者会合の評価書は、原子力規制委員会が行う新規制基準適合性審査に際し、重要な参考と位置づけられている。

3. シーム問題への取り組み

3.1 新規制基準

2013年、新規制基準が制定された。「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」[6]によれば、活断層についての審査のポイントは、『重要な安全機能を有する施設の地盤には将来活動する可能性のある断層等の露頭がないことを確認する。』を明記したこと、将来活動する可能性のある断層として『震源として考慮する活断層』と『地震活動に伴って永久変位が生じる断層』を明記したこと、そして将来活動する可能性のある断層を後期更新世以降（12～13万年前以降）の活動が否定できないものとし、これが明確に判断できない場合は中期更新世以降（約40万年前以降）まで遡って総合的な検討を行ない評価するとしたことである。

なお「まえがき」には、活断層の調査、評価に必要な3つの留意点があげられている。これらはいずれも過去の安全審査に係る実務の中で考慮されていた事柄である。特に活断層や地震時に永久変位を生じる断層が基礎底面上にあってはならないことについては、その実証が求められていた。

3.2 新規基準の追加調査実施への適用

「審査ガイド」の具体的な適用には、2014年12月10日の敦賀原子力発電所のピア・レビューで座長の加藤東大教授が総轄したように、科学的合理性に基づく総合的な評価、判断が肝要と考えられる。

例えば、「まえがき」にあげられた活断層の調査、評価に必要な留意点のひとつに、『2 変動地形的調査、地質調査、地球物理学的調査について、それぞれが独立した視点から行う調査であることを踏まえ、例えば変動地形的調査により、断層の活動を示唆する結果が得られ、これを他の調査で否定できない場合には、活動性を否定できないこと等を念頭に評価を進めること。』がある。この留意点の追加調査への具体的な適用では、評価は科学的かつ合理的説明性の観点から総合的になされるものであることを前提に、次の考え方で臨んだ。即ち、変動地形的調査により断層の活動を仮定できる場合であっても、地質調査や地球物理学的調査で具体的根拠を持って異なる結果を導きうる場合、評価は、調査の確度や精度、調査間における概査と精査の相補関係に照らしてなされるべきである。

また、既設原子力発電所を対象に、『活動性の調査に当たって、設置面での確認が困難な場合には、当該断層の延長部で確認された断層等の性状等により、安全側に判断する必要がある。』とされている。一方、同解説には、『地震活動に伴って永久変位を生じる断層及び支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面は、地震活動と常に同時に活動するとは限らない。このことを踏まえ、安易に、将来活動する可能性を否定してはならない。』とある。この下線部分の意味とその適用については、具体的かつ合理的根拠を持って科学的否定をも排除するものではないと考えられる。

3.3 追加調査の実施内容

シームに係る課題は、シーム自身が震源断層となりうるか、あるいは地震時に動いて永久変位を生じるかの2点である。いずれも後期更新世以降(12~13万年前以降)の活動の有無で判断する。以前なら変位地形法や断層上載地層法を適用した。しかし、既設発電所の地形面や表層の地層は建設時に失われていることが多い。シームの追加調査の実施にあたっては、既往の調査方法を追及しつつ、シームの成り立ちや関係する地質構造を解明する調査を取り入れた。そもそもシームがどのような地質構造なのか、断層現象がどのように係っているのかを調べたのである。その結果、活動性の検討にも重要なデータ

が得られた。

こうした調査を行なう前提として、シーム S-1 等対象となる地質構造の詳細な分布を把握する事が不可欠である。

以上についての具体的な調査項目には岩盤調査坑調査、ボーリング調査、トレンチ調査、ピット調査、露頭剥ぎ調査、および海岸露頭調査がある(図3)。

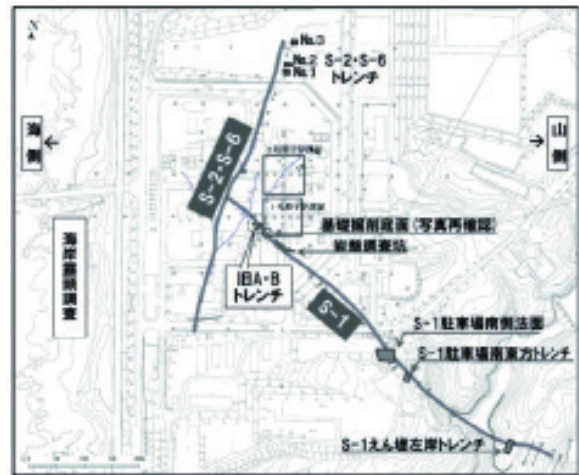


図3 シーム S-1、S-2・S-6 の上載地層法等配置図

4. シームとは何か?

破碎帯とは、断層で壊れたりズレたりした地層や岩石が、それなりの厚さを持って帯状に分布するものをいう。シームが基盤岩中に挟在する粘土質薄層であって、所謂破碎帯でないことは既述した。以下、シームとはどのような地質構造なのか、シームにおける断層現象とその規模、活動性の考え方について解説する。

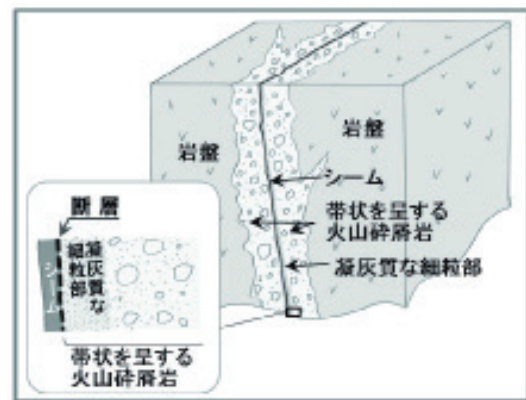


図4 シームに係る地質構造の概要

4.1 シームの鉱物学的な特徴

シームの主要な鉱物組成は、母材起源の斜長石等を除

けば、クリストバライト、スメクタイトが主で、このほか僅かながら沸石を検出している。クリストバライトもスメクタイトも熱水変質により生成する鉱物で、スメクタイトは比較的低温環境下で生成する。鏡下で詳細に観察すると、スメクタイトが分布する中には、強アルカリ環境下で生成する鉄サポナイトも散見される。なお、風化帯で粘土鉱物等はハロイサイト置き換わっている。

4.2 シームに係る地質構造

シームは“帯状を呈する火山砕屑岩”内の構造で、多くは“凝灰質な細粒部”に沿って分布する（図4）。

“帯状を呈する火山砕屑岩”は岩脈状の産状を示し、礫とマトリクスからなる火山砕屑岩状の岩石である。角礫岩相～細粒岩相の複数の岩相がしばしば貫入被貫入関係を示して分布する。周囲の穴水累層とは入り組んだ境界を持って漸移する。分布方向はシームと同じである。“凝灰質な細粒部”は細粒岩相で、線状ないし帯状に分布する。

“帯状を呈する火山砕屑岩”の礫とマトリクスは穴水累層の岩石に由来する。しばしば塑性流動状の組織・構造を示し、細粒岩相で顕著である。また、内部には正断層センスの変形構造を留める。“帯状を呈する火山砕屑岩”はシームを除き、いずれも周囲の穴水累層と同様に岩石化している。断層破碎による構造は全く認められない。

岩盤調査坑で実施した K-Ar 年代測定によれば、“帯状を呈する火山砕屑岩”中のマトリクスから採取した斜長石（20Ma 以上）には、周囲の穴水累層の安山岩のそれ（15Ma）よりも優位に古い年代のものが含まれる。下位の穴水累層の岩石が何らかの理由で粉碎され、岩砕や鉱物片からなるマトリクスと礫とが混交した流体となって、穴水累層中を上方へ移動したことを示唆する。

“帯状を呈する火山砕屑岩”は、おそらく第三紀中新世の安山岩火山活動の後期ないし末期に北北東-南南西方向、北西-南東方向の断裂形成に伴い、地下深部から供給と移動を繰り返したものと考えられる。

こうした“帯状を呈する火山砕屑岩”中におけるシームの産状・性状は、シームが、“帯状を呈する火山砕屑岩”や“凝灰質な細粒部”が形成され岩石化した後に出来たことを示す。

4.3 シーム内部の組織構造と断層

岩盤調査坑では、周辺岩相中の新鮮な安山岩礫がシームに入り込む、あるいはほとんどシームを横断する産状

を示すものがある（図5）。これらの礫に破断、断層破碎はまったくない。

また、シーム中に残る“凝灰質な細粒部”の組織や礫、二次鉱物の鉄サポナイト結晶はその形状をとどめており、断層破碎は認められない [7]。しかし、シームと周辺岩相との境界に沿って剥離させると、鏡肌や条線を伴う平滑な面が出現する。シームの形成後、シームの縁辺に断層現象を生じたことは間違いない。シームの活動性検討の対象はこの断層である。シーム幅は平均で mm オーダー、時に数 cm に及ぶが、断層の幅は mm オーダー以下で、平均的にはフィルム状と非常に薄い。

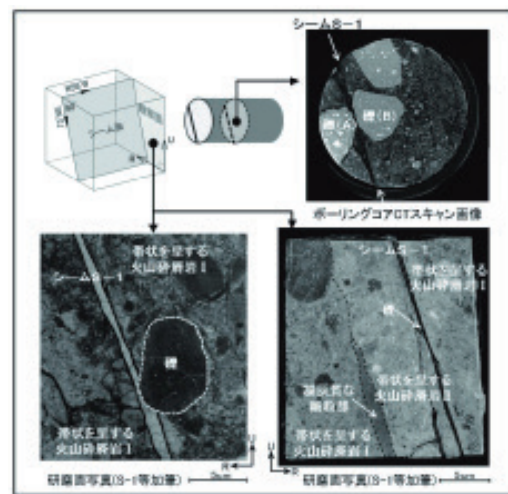


図5 “帯状を呈する火山砕屑岩”中のシームの産状例

4.4 シームの深部連続性と成因

シーム S-1 と直交する 2 測線でボーリング調査を行い、シームの深部連続性を調査した。その結果、“帯状を呈する火山砕屑岩”の中でも、シームが分布するのは深度 200m 程度より浅所で、深部には連続しない [8]。

シームの母材である“凝灰質な細粒部”が変質してスメクタイトを形成するためには水が必要である。シームが深部にないということは、水が地下深部からではなく地表からもたらされたことを示す。

“凝灰質な細粒部”は“帯状を呈する火山砕屑岩”中の相対的な弱部である。その縁辺に沿い、シームは、地表から浸透した天水や海水と“凝灰質な細粒部”とが反応し、低温熱水変質することで形成されたと考えられる。低温熱水変質作用にもそれなりの温度は必要であるから、その形成は穴水累層形成の火山活動末期と考えられる。なお、シームのスメクタイトで実施した K-Ar 年代測定値は 10Ma であった。K-Ar 年代測定法をスメクタイトに用いるには問題もある。しかし、この値は、「5.2」

に後述する断層形成時期に近い。

4.5 断層部分の変位規模

4.1～4.4を通覧すると、シームは“帯状を呈する火山砕屑岩”中の岩相境界で、地表付近から浸透した水の存在の下、低温熱水変質作用により形成された粘土質薄層である。縁辺には断層をともない、その幅は平均的にはフィルム状程度にすぎない。断層というより割目に近い。こうした断層が、断層の長さと同幅の関係から、数10cm規模の大きな断層変位を繰り返してきたとは考え難い。

5. シーム S-1 の断層部分と活動時期

断層の活動時期を知る一助として条線を検討した [9]。

5.1 シーム S-1 の断層部分形成時の応力場

シーム S-1 の追跡では、断層部分の最新活動面を出して条線の観察も行った。条線は断層や割れ目がズレる際に出来る擦りキズのことである。この条線の方向から、それができた応力場を求めることができる。

シーム S-1 は断層部分が右横ズレ逆断層として動いたことが分かっている。山路他の多重逆解析法 [10] により応力場を求めると、最大主応力軸の方向は時計周りの方位角 16.7° 、水平からの伏角 44.9° の圧縮、また最小主応力軸の方向は方位角 272.6° 、伏角 13.8° の圧縮であった [11]。これは、シーム S-1 が南北性圧縮の応力場にあつてシームの縁辺にズレを生じ、断層部分ができたことを示す。

5.2 広域応力場を仮定した活動時期

能登半島周辺の新第三紀以降の広域応力場の変遷は次の通りである [12],[13],[14]。

中新世前期には漸新世に始まる日本海の形成と拡大があり、引張性の応力環境が支配的であった。しかし、中新世中期の初頭 (13～8Ma) に応力場の大転換があつた。この大転換後西南日本弧の能登半島周辺の地質構造形成は、北北西-南南東方向の最大圧縮主応力軸を持つ南北性圧縮の応力場で進行した。その後鮮新世が始まる前後の6～5Ma以降は最大主応力軸の方向が現在のそれに近い東西性圧縮の応力場に転換した。

シーム S-1 と同じ方向のものを含め、シームや“帯状を呈する火山砕屑岩”は能登半島西岸の穴水累層の随所に散見されることから、シーム S-1 の断層の最新活動に

広域応力場を想定すると、約1千万年前前後となる。

なお、志賀1号機原子炉建屋基礎底面では、シーム S-1 の断層部分は“帯状を呈する火山砕屑岩”末期の岩相に断層変位を与えておらず [15]、その活動時期は、条線から推定した時期と矛盾しない。

5.3 局所応力場での挙動可能性

敷地近傍の断層に敷地に最大規模の地変を生じる活動を想定し、その際のシーム S-1 断層部分の挙動可能性を検討した。この検討には原子炉建屋から約1km東方の福浦断層や西方海域の兜岩沖断層をあてた (図6)。

ともに南北方向の断層で、長さ3kmに満たない逆断層である。これらの断層にM6.9相当の地震を起こす長さ21.2km、幅14.1kmの震源断層を想定し、「くい違い弾性論」に基づき、シーム S-1 の断層部分での最大せん断ひずみの方向を求めた。

その結果、シーム S-1 の周辺で発生する最大せん断ひずみの方向は左横ずれ正断層の動きを示唆するもので、右横ズレ逆断層の条線方向に対し抑制する方向であった [16]。断層の活動長さを変えるなどのパラメータスタディの結果も同様である。

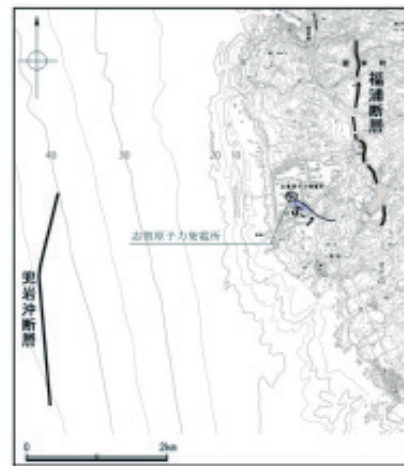


図6 活動時の局所応力場を検討した周辺断層

5.4 断層部分の活動時期

5.3によれば、旧トレンチ位置を含むシーム S-1 の断層部分が、敷地近傍の断層の活動に伴う局所応力場の下で動いたとは考え難い。5.2をも考慮すると、シーム S-1 の形成およびその断層部分の最新活動は、少なくとも鮮新世に入る前に終了したものと考えられる。

参考文献

[1] 「北陸電力株式会社志賀原子力発電所の敷地内破碎

- 帯の評価について〈案〉」，平成27年11月20日
原子力規制委員会志賀原子力発電所敷地内破砕帯の
調査に関する有識者会合
- [2] 片川秀基・中嶋光浩：原子力発電所に敷地内破砕帯
問題：志賀原子力発電所の敷地内シームの評価（そ
の2），保全学，pp. 22-28 (2016)
- [3] 「敷地内破砕帯の追加調査計画の策定について（指
示）」20120718 原院第1号，平成24年7月18日
経済産業省
- [4] 「敷地内破砕帯調査に関する有識者会合の進捗状況
について（報告）」，平成28年1月6日 原子力規
制庁
- [5] 「北陸電力株式会社志賀原子力発電所の敷地内破砕
帯の評価について（案）」，平成28年3月3日 原
子力規制委員会志賀原子力発電所敷地内破砕帯の調
査に関する有識者会合
- [6] 「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る
審査ガイド」，平成25年6月 原子力規制委員会
- [7] 「志賀原子力発電所敷地内破砕帯に関する追加調査
コメント回答 資料-6 熱水変質史」，志賀・現
調3-1，平成26年7月11日 原子力規制委員会志
賀原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者
会合
- [8] 「志賀原子力発電所敷地内破砕帯に関する追加調査
コメント回答 II. 1. シーム S-1 の深部連続性
に関する調査結果」，志賀・現調5-2，平成26年12月
26日 原子力規制委員会志賀原子力発電所敷地内
破砕帯の調査に関する有識者会合
- [9] 「志賀原子力発電所敷地内破砕帯に関する追加調査
コメント回答 II. 2. シーム S-1、シーム S-2・
S-6 等の多重逆解法による応力場の推定」，志賀・
現調5-2，平成26年12月26日 原子力規制委員会
志賀原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識
者会合
- [10] Atsushi YAMAJI, Katsushi SATO, and Makoto
OTSUBO: “Multiple Inversion Method Software
Package User’s Guide”, <http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp>,
(2011)
- [11] 「志賀原子力発電所敷地内破砕帯に関する追加調査
コメント回答 II. 1. シーム S-1, S-2・S-6 等の
運動方向データ」，志賀・現調5-2，平成26年12月
26日 原子力規制委員会志賀原子力発電所敷地内
破砕帯の調査に関する有識者会合
- [12] 片川秀基：東北日本弧と西南日本弧の境界領域にお
ける地質構造形成メカニズムの研究 - 能登地区の
新第三紀・第四紀の地質構造形成史から -，東京工
業大学学位論文，(2004)
- [13] 岡村行信：能登半島および周辺海域の地質構造発
達史と活構造，活断層・古地震研究報告，No.7，
pp.197-207, (2007)
- [14] 尾崎正紀：20万分の1地質図及び説明書「能登能半
島北部沿岸域」，海陸シームレス地質情報集，数値
地質図 S-1，地質調査総合センター，(2010)
- [15] 片川秀基・中嶋光浩：原子力発電所の敷地内破砕帯
問題：志賀原子力発電所の敷地内シームの評価（そ
の2），保全学，(2016)
- [16] 「志賀原子力発電所敷地内破砕帯に関する追加調査
コメント回答 I. 3. シーム S-1 の北西部（旧ト
レンチ付近）に関する応力解析」，志賀・現調5-2，
平成26年12月26日 原子力規制委員会志賀原子
力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合

(平成28年2月12日)

著者紹介



著者：片川 秀基
所属：
北陸電力株式会社 土木部
専門分野：地質、地盤、耐震



著者：中嶋 光浩
所属：
北陸電力株式会社 土木部
専門分野：土木耐震、品質保証