2019 年 10 月 7 日

大飯発電所の地盤構造について
－岩盤の亀裂および断層破砕帯に伴う地震波速度の低下－

赤松純平

1. はじめに

筆者はこれまで、関西電力株式会社（関電）が実施した地盤調査結果を分析して、大飯発電所の敷地の地盤が、関電の主張するような堅固で均質な水平成層構造ではなく、断層破砕帯の影響を受けた不均質で脆弱な地盤であることを明らかにし、関電が策定した地盤構造モデルでは基準地震動が過小評価されることを指摘してきた[1]。そして、関電は地盤構造モデルを、調査結果の隠蔽、予断に充ちた恣意的解釈、結果を誘導する解析処理などで捏造しており、科学技術を冒涜する所作以外の何物でも無いと強く批判した[1]。

これに対し、関電は準備書面(22)[2]で、主に地質調査結果等を引用しながら、断層破砕帯の存在には一切触れずに、敷地の岩盤は均質堅硬であり、地盤構造モデルは合理的であると従前の主張を繰り返している。

本稿では、準備書面(22)が取りあげたボーリング調査結果を用いて、標高約－300m の深さまで岩盤の亀裂および断層破砕帯の影響により地震波速度の低下と不均質が存在することを明らかにし、関電の主張が誤りであることを指摘する。

なお、註、参考文献、図表、付図などは末尾に纏めた。

2. 原子炉建屋基礎地盤の断層破砕帯と地震波速度

敷地には F-1～F-6、f-1～f-4、A～E の 15 本の断層破砕帯が確認されている。図 1 に破砕帯の位置図[3、79 頁]を引用した。3、4 号炉建屋直下には F-1～F-5、f-1～f-4 が、最大規模の F-6 は 2 号炉と 3 号炉の間にある。関電は、新規制基準の施行に伴う見直し（バックチェック）のために、トレンチ調査、ボーリング調査等を実施して破砕帯の連続性と活動性とを調べ、敷地内破砕帯評価のまとめとして

『○耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の直下に位置する原子炉設置位置付近の破砕帯は、将来活動する可能性のある断層等ではないと評価する。

○耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の直下に位置しないその他の敷地内の破砕帯は、震源として考慮する活断層ではないと評価する[3、144 頁]』とした。

このまとめでは、断層破砕帯が活断層であるか否かのみの観点で評価されており、地盤震動特性としての観点、すなわち、3、4 号炉基礎岩盤における断層破砕帯による構造変化、シーム（破砕帯に付随する割れ目）の規模や分布様式などが地震時の震動性状に及ぼす影響は全く考慮されていない。

一方、関電は原子炉建設以前の試掘坑における地震波速度の調査で、地震波速度が場所によって大きく変化することを把握していた。平成 28 年 2 月の事業者ヒアリングで『試掘坑内の平均速度法による弾性波試験結果は、第 5.110 図に示すようにP 波速度は 3.0km/s～5.2km/s で平均値 4.3km/s、変動係数 7.0%である[4、159 頁]』と説明しているが、大きく変動する原因を地質構造に関連づけることもなく、規制委員会もこのことを不問に付している。

この地震波速度の場所による変動は断層破砕帯とそれに伴うシームの分布性情に起因する[1、6 頁]。図 2 に 3、4 号炉基礎岩盤におけるシームの分布図と P 波速度の分布図とを並べて示す。シームの分布図は関電のスケッチ[3、27 頁]を引用したもの、P 波速度の分布図は弾性波試験結果[4、図幅集第 5.110 図、105～108 頁]を読み取ってコンター表示したものである[1、6 頁]。破砕帯の走向は概ね南北方向である。破砕帯に付随するシームは 4 号炉の北西側から 3 号炉の南東側に分布密度が増加し、これに相関して P 波速度が北西側から南東側に系統的に低下している。すなわち、岩盤の物性としてよく知られているように、割れ目の多い場所で地震波速度が低下しているのである。関電は 3.0～5.2km/s におよぶ速度変化のあることを無視し、また自ら平均値は 4.3km であると説明[4、159 頁]しながら、基準地震動評価用の地盤モデルでは、表層の P 波速度を 4.6km/s[5、57 頁]としている。

3. 岩盤分類と地震波速度

3.1 岩盤の物性と岩石の物性の違い

準備書面(22)には、『ボーリングコア及び試掘坑壁で観察した岩盤について，電研式岩盤分類 [註 1]の手法により分類を行ったところ，大飯３，４号機の原子炉建屋付近の硬岩の岩盤は，岩級区分は CM 級以上であり岩質は堅硬であること，かかる堅硬な岩盤が，図表 6 のとおり，著しい高低差がなく，ほぼ水平に広がっていることが確認できた。また，ボーリングコア及び試掘坑内から採取した試料について，その他物理試験，超音波速度測定及び力学試験も実施して，岩盤が堅硬であることを確認している[2、17～18 頁)]』と記されている。

しかしながら、岩盤の地震波速度などの物理特性は、ボーリング・コアなどの岩石資料の物性とは異なることはよく知られている。日本材料学会は、『岩盤は大小様々の不連続面（地質学的分離面）を含んだ複雑な構造体である．岩盤の力学挙動は，構成母岩材の材料特性と不連続面の配置状態およびそれら不連続面の力学特性が混ざり合って発揮された結果として具現し,岩石が示すそれとは本質的に異なる』、『岩盤については鋼構造物に対するように，構成材料（岩石）の特性を知って目的とする構造物全体の力学挙動を予測するといった力学の図式は単純にあてはまらない』、『不連続性岩盤の力学挙動が信頼し得る精度で予測・評価できるためには，不連続面の分布性状および力学特性が明らかにされるとともに，それら不連続面の影響を合理的に評価し得る力学モデルが確立されねばならない』と述べている[6、445 頁]。

図 2 に示されたシームの分布と P 波速度の分布の類似性は、大飯の岩盤が典型的な不連続性岩盤であることを示している。岩盤工学あるいは地質工学において、岩盤の不連続性、すなわち亀裂の幅や頻度などの性状は最も重要な調査項目である。事実、関電自ら行ったボーリング調査の柱状図には、不連続性岩盤の指標である最大コア長、RQD[註 2]などが綿密に記載されている[7、6-3-588～641 頁、第 3.5.28 図]。関電は、これらのデータの分析結果を明示することもなく『RQD は高くないが、細粒石英閃緑岩及び輝緑岩そのものは堅硬で、節理は密着していることから、基礎岩盤は安定した岩盤である』としている[2、12 頁]。この準備書面(22)の記載は、岩石資料の物性をそのまま不連続性岩盤の物性にすり替えるものである。以下にボーリング柱状図のデータに基づいて岩盤の不連続性とそれに伴う速度の低下を明らかにする。

なお個々に取りあげて説明しないが、全てのボーリング柱状図の岩級区分、最大コア長、RQD の鉛直分布を図化して、末尾の付図 1～10 に、また柱状図の読み取り手順を付図 11 に掲載する。

3.2 岩級区分の鉛直分布とボーリング孔の位置による変化

図 3 に、準備書面(22)に示されている地質断面図[2、図表 6、18 頁]を引用する。地質断面図は、標高－200m まで全体的に水色で示された CH 級岩が分布し、4 号炉直下では、CM 級岩（黄色）は－40m 付近と F-2 破砕帯が斜めに沈み込む－90m 付近に限って分布するように描かれている。

この断面図を作成した 10 本のボーリングの柱状図が発電用原子炉設置許可申請書の添付書類に記載されている[7、6-3-588～641 頁、第 3.5.28 図]。このボーリングは建設前に掘削されており、柱状図には岩盤分類、RQD、最大コア長などが、また炉心位置の No.1157 孔、No.1158 孔にはダウンホール方式による PS 検層結果が付されている。炉心位置の 2 本は標高約－300m まで、他の 8 本は約－150m まで掘削されている。ボーリングの位置を図 4 に示す。No.1153～1156 孔は 3、4 号炉の北西側、No.1159～1162 孔は南東側に、それぞれ直線状に並んでいる。

図 5 に 4 号炉直下の No.1157 孔の柱状図の値を図化して示す。岩盤分類（岩級）は 0.5m～10 数 m 幅で CM 級と CH 級とが交互に現われる。地質断面図に重ねて示した岩級分布図では、層厚が細かすぎて分離できず、CM 級と CH 級とが重なり、CH 級が連続しているように見えるので、図 5 の下部に 50m 長ごとに分けて示した。関電は地質断面図の殆ど全てを水色一色の CH 級としているが、元データでは CM 級が深部にまで分布している。標高 0m 以深では、厚さにして全体の 27.9%が CM 級である。また、断面図に記載されていない標高－200m 以深では、約－266～－282m に厚さ 16m に及ぶ CM 級の層のあることが注目される。

図 6 にすべてのボーリング柱状図の岩級区分を色分けして示す。岩級は、B(濃紺)、CH(青)、CM(橙)、CL(赤)、D(茶)、破砕帯(紫)である。柱状図の標高は、地質断面図の標高に合わせてある。全てのボーリング孔で CM 級(橙)が深部にまで分布しているが、CM 級の集中する深さはボーリング孔によって異なる。

表 1 に各岩級の層の厚さが占める割合を示す。標高 0～－150m の範囲では、全体の約 37%（約 55m）が CM 級以下の岩級である（表 1(1)）。堅硬さの劣る CM 級以下の岩盤が全体の 1/3 以上を占めることに加え、位置による岩級分布の違いが顕著である。すなわち、3、4 号炉の北西側の No.1153～1156 孔 4 本を平均すると、CM 級以下は 31.3%、炉心直下の No.1157、1158 孔で 33.1%、南東側の No.1159～1162 孔では 47.7%と、北西側から南東側に CM 級以下が増加し、岩盤が弱くなっている（表 1(3)）。特に南端の No.1159 孔は半分以上の 53%が CM 級以下である。標高－150m までの岩級分布による北西側から南東側への岩盤の劣化傾向は、図 2 に示した標高 0m のシームの分布密度や P 波速度の場所による変化の傾向と一致している。このことは、深部でも南東側で地震波速度が低下していることを示している。

3.3 最大コア長のボーリング孔の位置による変化

電研式岩盤分類は岩質の風化・変質度と節理（不連続面）の性状を指標に、定性的な記述式の分類であり、判定には個人差が含まれる[6、544 頁]。このため、不連続面を含む岩盤物性のボーリング調査によるより客観的な指標として、採取されるコアの長さや RQD が用いられる。この節では最大コア長の分布を検討する。最大コア長は、1m 区間ごとに採取されたコアの最大の長さをセンチメートル単位で記す。それぞれのボーリングの最長コア長の鉛直分布は、付図 1～10 を参照されたい。

表 2 に最大コア長の平均値を纏めた。標高 0～-150m 区間では、値はボーリングによって 12.5～18.8cm に分布しており、全体の平均値は 16.0cm である（表 2(1)）。No.1157 と 1158 孔の標高－150～－300m 区間では、平均値は 17.7cm であり、深部で不連続性が僅かに弱まっている（表 2(2)）。

図 7 に標高 0m 以深の最大コア長の頻度分布を示す。全データの平均値は 16.3cm である。標高－300m の深さまで、全体の約 23%が 10cm 以下、約 56%が 15cm 以下である。これらは最大コア長の値であるから、採取されるコアはさらに短いことに注意を要する。

表 2(3)に、炉心の北西側、炉心位置、南東側の平均値（標高 0～－150m）が示されている。最大コア長は、北西側の 18.0cm から、炉心直下の 16.2cm、南東側の 13.9cm へと、値が系統的に大きく減少している。これは、北西側から南東側へ、岩盤の不均質性が増していること、すなわち亀裂の頻度が増していることを表している。前節で指摘した位置による岩級分布の違いと同じく、最大コア長の分布も、深部まで南東側で岩盤が劣化して地震波速度が低下していることを顕著に表している。

3.4 RQD の鉛直分布とボーリング孔の位置による変化

関電は『ボーリングコアの採取率は 100%であり，高角度傾斜の節理が発達していることから RQD は高くないが，細粒石英閃緑岩及び輝緑岩そのものは堅硬で，節理は密着していることから，基礎岩盤は安定した岩盤であると考えられる[3、12 頁]』と問題がないかのごとく主張しているが、高くないとする RQD の値がどの程度なのか具体的には明示していない。RQD の値が小さく亀裂の多い脆弱な岩盤では、地震波伝播速度が小さいことはよく知られている（後述）。関電自ら、美浜原発敷地の地盤について『RQD が小さい深度及び孔径が大きい深度、つまり割れ目が多く、地質

的に脆弱な深度において Vp と密度の低下が確認された[8、42 頁]』と RQD の小さい層が低速度層であることを認めている。この節では、ボーリング柱状図に記載されている 1m 毎の RQD の値の深さ分布、ボーリング孔の位置の違いによる変化、岩級区分との関係などを検討する。

図 5 には、4 号炉直下の No.1157 孔の RQD の 1m 毎の値と 5m 区間の移動平均値とが重ねて示してある。RQD の大部分は 50%以下である。特に CM 級の層の RQD は小さく、岩級分布と RQD の相関は高い。最長コア長と RQD の分布傾向も概ね似ている。

岩盤分類の基本概念として、『RQD が 50～70%が普通、75%以上が良好で、90%以上は非常に良好な岩盤』とされている[6、541 頁]。4 号炉直下の No.1157 孔では RQD が 50%を越えるのは稀であり、岩盤は普通以下に分類されることになる。このことを詳しく見るために、提示されている 10 本全てのボーリング柱状図の RQD を図 8 に示す。RQD は 1m 区間の値と 5m 区間の移動平均値とが重ねて描いてある。ボーリング孔の位置は図 4 に示されている。

図 8 から明らかなように、RQD は深さ方向に数～数十メートルの幅で増減している。割れ目が多く速度が低下していると考えられる 25%以下の区間は、例えば、4 号炉西側の No.1159 孔で EL -10～-70m、直下の No.1157 孔で EL -0～-13m、-70～-90m、-125～-145m、-265～-285m、3 号炉西側の No.1155 孔で EL -20～-70m、直下の No.1158 孔では部分的に 25%を僅かに越える場所があるが EL -30～-130m、-200～-230m、東側の No.1162 孔で El 0～-80m などの深さにあり、ボーリングの位置によって RQD の小さい層の深さが異なる。共通した深さで RQD が著しく低下するような地層は形成されていない。このことは、断層破砕帯がシームを伴って高角度で沈み込み、それぞれのボーリング孔とは異なる深さで斜交していることを反映したものと考えられる。

表 3 に標高 0m 以下の層の RQD の平均値を纏めた。10 本のボーリング全ての平均値は (28.7±25.1)%である（データ数 1,764）。先に記した岩盤分類の基本概念では 50～70%が普通[6、541 頁]とされているので、大飯サイトの岩盤は全体として不連続面の多い普通以下の岩盤ということになる。標高－150m で分けると深い方が若干値は増加する（表 3(2)）が、表 3(3)に示すように、深さと共に単調に増加しているので

はないことが注目される。RQD は標高－25～－50m で低下、－100～－125m で最大になるが－125m 以深では深くなるほど減少している。この RQD 平均値の深さ方向の変化を図 9 に示した。岩盤中の不連続面は深いほど圧密によって固着すると考えられるが、圧密の作用以上に不連続性が増している。

さらに、場所による違いが顕著である。すなわち、表 3(4)に示したように、3、4 号炉の北西側の No.1153～1156 孔の平均値は 33.6%、3、4 号炉直下の No.1157 孔と No.1158 孔とは 27.8%、更に南東側の No.1159～1162 孔は 22.6%であり、北西側から南東側へ RQD 平均値が系統的に著しく減少している（図 14 参照）。この傾向は、図 2 に示したように、原子炉建屋基盤岩で、破砕帯に伴うシームの分布密度が北西側から南東側に系統的に増加（RQD の低下に相当）する傾向と似ている。このことは、標高 0m 付近のシームの分布傾向が深い位置にまで連続しており、深部でも場所によって速度が変化していることを示している。

次に、深部での場所による違いを検討するために、深さ毎の RQD の分布を調べる。図 10 は各ボーリング孔の深さ 25m 毎の平均値を内挿して得たコンター図である。図の左上は試掘孔における P 波速度の場所による変化（図 2 再掲）である。右下は標高 0～約－150m の平均値（表 3(1)）を図化したものである。RQD の彩色表示のスケールは同じで、緑色が RQD 大（速度大に相当）、黄色から赤色に移行するに従い RQD が小さくなる（速度小に相当）。また、ボーリング孔の位置を茶色の点で示す。

図 10 の表示空間は 3、4 号炉建屋を含む 240m×130m の直下である。僅か 10 地点によるコンター図であるので、1 地点の値によって目玉が生じるなど全体の傾向は安定しない。しかしながら、標高 0～－150m の図（右下）に見られるように、図の上部（北西側）で RQD が大きく、下部（南東側）で小さいという傾向は、概ね、それぞれの深さに共通するようである。深さによって図の形が変化することは、先に述べたように、「断層破砕帯がシームを伴って高角度で沈み込み、それぞれのボーリング孔とは異なる深さで斜交していることを反映した」と考えられる。

図 10 左上の P 波速度コンター図は 1,378 個の速度値によって作成されている[1、5～7 頁]。一方 RQD の図は僅か 10 本のボーリング孔のデータによっている。データ量の違いによる質の違いはあるにしても、両者は類似した傾向を示しており、同一の地質条件（断層破砕帯と付随する亀裂の存在）を反映していると考えられる。深部で

も破砕帯に関係して場所によって速度が変化していることが危惧されるが、しかし、PS 検層結果については、関電は No.1157 孔と No.1158 孔の 2 本を示すのみで、No.1153～1156 孔および No.1159～1162 孔 8 本については開示していない。

図 5 の右端に示した PS 検層結果による P 波と S 波の速度は、均質で大きい値を示していて、RQD の分布とは整合しない。これは原子炉建設以前の PS 検層が、技術レベルの低いダウンホール方式であることに起因する。新規制基準のための見直し調査では、区間速度が直接計測できるフローティング方式の PS 検層が実施され、O1-3 孔と O1-11 孔の S 波速度は表層や深部で低速度であることが確認されている[1、図 1、2]。

3.5 RQD と最大コア長、岩級区分、および地震波伝播速度との関係

付図には、10 本のボーリング孔について、岩級区分、最大コア長、RQD の図が並べて示してある。各項目の相互関係について整理し、問題点を指摘する。

図 11 にボーリング孔毎の最大コア長と RQD の関係を示す。柱状図に 1m 毎に記載されている最大コア長と RQD の値（標高 0m 以深）をプロットしたものである。表 2 にボーリング孔毎の最大コア長の平均値、表 3 に RQD の平均値が示されているが、それらの値の分散の程度がこの図から確認出来る。

図 12 に 10 本全てのボーリング孔の値を示す。RQD の定義から、図中の赤点線は採取されたコアの中で、RQD 値として数えられたコアが、(a)は最大コア長のコア 1 本のみ、(b)は最大コア長と 10cm 長のコアの計 2 本、(c)は最大コア長と 10cm 長 2 本の計 3 本、あるいは最大コア長が 20cm 以上の場合は最大コア長と 20cm 長 1 本の計 2 本であることを示す。最大コア長が 10cm 未満では RQD=0 である。図 12 では、(b)、(c)線上に多くの点がある。10cm 未満だが 10cm に近いコアは 10cm とカウントして RQD を増やしたいという心理作用の結果と考えられる（恣意的な操作でないことを期待するが）。

図 11 および図 12 では、分散は大きいが最大コア長の増加に伴って RQD も概ね比例して増加している。3.3 節において図 5 の説明に「最長コア長と RQD の分布傾向も概ね似ている」としたのは、この大まかな比例関係を反映したものである。

表 4 に、各ボーリング孔について、CM 級以下と CH 級以上に 2 分した岩級別の RQD 平均値を示す。また図 13 に、その関係を棒グラフで示した。RQD は、CM 級以下では 10.0%、CH 級以上では 39.1%とその差は大きい。

岩盤中の亀裂がランダムに分布すると仮定した場合、RQD と単位長あたりの亀裂数（λ）の関係は

$RQD = 100 \times (0.1\lambda + 1)e^{-0.1\lambda}$ と表される[9]。亀裂数は単位長の測線が何本の亀裂と交錯するかを数える。この関係式によれば、1m あたりの亀裂数は CM 級岩盤では約 40 本、CH 級岩盤では約 20 本である。すなわち、平均のコア長は、CM 級岩盤で 2.5cm、CH 級岩盤で 5cm である。関電は、『岩級区分は CM 級以上であり岩質は堅硬である[2、17 頁)]』と主張しているが、CM 級以上の岩盤においても物性値にこれほど大きな差異のあることを秘している。なお、全体の RQD 平均値 28.7%は亀裂数 25 本、平均コア長 4cm に相当する。

RQD と P 波速度との関係は古くから調査研究されている。ボーリング・コアなどの岩石資料の P 波速度が Vm で、RQD の値が R である岩盤の P 波速度 V は、

$R = a(V - b)$ で近似され、R=100 のとき V=Vm となることが、現場測定や数値シミュレーションなどで示されている[10、11]。すなわち、亀裂が全く無い岩盤の速度は岩石試料の速度と同じであり、亀裂の増加と共に RQD に比例して速度が低下する。そして、常数 a、b は構成母岩の種類によって変化し、例えば Vm=5.4km/s の閃緑岩では、a=59、b=3.7 が報告されている[10]。その関係を図 15 に引用する。大飯敷地の基盤岩のひとつである細粒石英閃緑岩は、超音波速度測定で P 波速度が 5.03km/s とされている[2、19 頁、図表 7]ので、この値を使うと、標高 0～－300m の岩盤は次のようになる。岩石資料と岩盤の速度が亀裂によって大きく低下することが分かる。

	RQD	Vp
全体として	28.7%	3.82km/s
CH 級岩層	39.1%	4.00km/s
CM 級岩層	10.0%	3.50km/s

図 9 には RQD 平均値の深さ変化が示されているが、それに対応する P 波速度の深さ変化を図 16 に示す。標高－300m の深さまで 4km/s 未満であり、深部での低速度層の存在が示唆される。関電は、基準地震動評価用の地盤モデルで、深さ 300m までは 4.6～4.7km/s としているが、4.6～4.7km/s であるためには、RQD は 75～80%でなければならず、ボーリング調査結果から大きくかけ離れている。

RQD と速度とを関係づける常数 a、b は、岩石の種類によって異なるので、この P 波速度に変換した値には議論の余地があるが、RQD の値の深さ方向とボーリング位置による変化は現実に存在するので、速度の不均質が存在する。均質で堅固な岩盤ではない。

4. まとめ

「大飯発電所発電用原子炉設置許可申請書（３、４号炉完本）本文および添付書類平成 29 年 5 月現在関西電力[7]」に記載されている 10 本のボーリング柱状図を分析した結果、以下のことが明らかになった：

(1) 電研式岩盤分類によると、標高約－300mの深さまで CM 級と CH 級とが交互に現われ、標高－270m の深部においても厚さ 16m に及ぶ CM 層が存在する。標高 0～－150m の深さでは、CM 層は全体の 37%（約 55m 厚）に達する。3、4 号炉の北西側から、炉心直下、南東側へ CM 級以下の岩盤の割合が 31.3%、33.1%、47.7%と系統的に増加し、岩盤が脆弱になっている。（図 5、6. 表 1）

(2) 岩盤の亀裂間隔の指標である最大コア長の平均値は 17.2cm（標高０～－300m）である。亀裂がランダムに入っているとすると、平均のコア長（亀裂間隔）は 4cm である。3、4 号炉の北西側から、炉心直下、南東側へ最大コア長は 18.0cm、16.2cm、13.9cm（標高０～－150m）と系統的に減少（亀裂数が増加）し、岩盤が脆弱になっている。（図 7、表 2）

(3) 岩盤の不連続性（亀裂）の指標である RQD の平均値は 28.7%（標高 0～－300m）である。RQD の平均値は、標高－100～－125m が最も大きく、深部で減少しており、深部での脆弱化～低速度化が示唆される（図 9、16）。RQD が極端に低下する深さは、ボーリングの位置によって異なっている（図 8）。高角度で沈み込む断層破砕帯とそれぞれ異なった深さで斜交するためと考えられる。RQD 平均値（標高 0～－150m）は、3、4 号炉の北西側で 33.6%、炉心直下で 27.8%、南東側で 22.6%であり、北西から南東にかけて系統的に顕著に低下している。（図 5、8、9、14. 表 3）

(4) 深さ 25m 毎の RQD 平均値によるコンター図は、深さによってその形が変化するが、概ね標高 0～-150m 平均値の形状と似ている。すなわち、概ね北西から南東にかけて RQD は減少している。（図 10）

(5) 敷地の細粒石英閃緑岩の P 波速度 5.03km/s に、閃緑岩に関する RQD と P 波速度の関係を適用すると、RQD の平均値 28.7%は Vp=3.82km/s に相当する。岩盤区分の違いによる RQD の差異は大きく、CM 級以下の 10.0%は 3.50km/s、CH 級以上 39.1%は 4.00km/s に相当する。（3.5 節）

(6) 標高 0m の原子炉建屋基礎岩盤では、4 号炉の北西側から 3 号炉の南東側へ、断層破砕帯に伴うシームの分布密度が系統的に増加し、これと相関して P 波速度が系統的に顕著に低下している。シームの分布密度の増加は RQD の減少に相当し、地震波速度を低下させる。（図 2）

(7) (1)岩級区分、(2)最大コア長、(3)RQD の分布が共通して、北西側から南東側へ、岩盤の脆弱化（亀裂の増加）および地震波速度の低下を示している。基礎岩盤におけるシームによる速度異常が深部にまで及んでいる。

本稿では関電のボーリング資料を分析して、標高 0m 付近の原子炉建屋基礎岩盤に見られる断層破砕帯とそれに伴うシームによる地震波速度の偏倚が、標高－300m の深部にまで続いていることを示した。種々の物理探査の結果と同じく、地質資料によっても地盤構造の不均質性が確認された。基準地震動の策定には、断層破砕帯が地盤の震動特性（サイト特性）に及ぼす影響を考慮すべきである。このためには、敷地の 3 次元構造を正しく把握することが強く求められる。

(以上)

註

[註 1] 電研式岩盤分類：電力中央研究所が、当初はダムの基礎岩盤の分類のために提唱した分類方法で、岩質の風化・変質度と節理（不連続面）の性状を指標に定性的な記述式の判定を行う。A（きわめて新鮮）～D（著しく軟化）の 5 段階とし、C は更に CH、CM、CL に細分される。以下のような特徴（CH、CM のみ記載）を、地質ハンマーによる打撃と目視で判定する。

CH 級と CM 級の特徴の違いは以下のようである：

岩級	風化作用による岩質	節理・き裂間の粘着力	ハンマーによる岩塊剥奪	剥奪面の残留粘土質	打診音
CH	比較的堅硬	僅かに減少	強打による	薄層残留	すこし濁った音
CM	多少軟質化	多少減少	普通程度の打撃	層の残留	多少濁った音

[註 2] RQD（Rock Quality Designation）：岩盤の不連続面の分布や性状を間接的に評価する岩盤分類指標のひとつ。ボーリング・コアを採取し、コア長 10cm 以上の棒状のコアの長さの合計がコア全長に占める割合（%）をいう。50～70%が普通、75%以上は良好、90%以上は非常に良好な岩盤とする[7、541 頁]。

謝　辞

ボーリング柱状図（No.1153～1156、No.1158～1162 の 9 枚）の岩級区分の深さの読み取りとデータ整理は、京都第一法律事務所弁護士・渡辺輝人氏による。3.2 節および 3.5 節は氏の読み取り結果に負うところが大きい。記してお礼を申し上げる。

参考文献

[1] 赤松純平、大飯発電所基準地震動策定における問題点－地盤構造モデルについて－、2018.1.8 (甲第 422 号証).

[2] 関電、準備書面(22)、令和元年 7 月 25 日.

[3] 関電、第 332 回審査会合、資料 1-2-1 大飯発電所地盤（敷地の地質・地質構造）について、平成 28 年 2 月 19 日.

[4] 関電、大飯 3、4 号炉設置許可基準規制等への適合性について(地盤) 平成 28 年 2 月 23、「大飯発電所 3、4 号機の地震等に係る新基準適合性審査に関する事業者ヒアリング(65)」提出資料(000147041).

[5] 関電、第 332 回審査会合、資料 1-3 大飯発電所地震動評価について、平成 28 年 2 月 19 日（丙 179 号証).

[6] 日本材料学会編、岩の力学－基礎から応用まで、平成 5 年.

[7] 関電、大飯発電所発電用原子炉設置許可申請書　(3、4 号炉完本)　本文および添付書類　平成 29 年 5 月現在（丙第 178 号証添付書類⑥).

[8] 関電、第 257 回審査会合、資料 2-2 美浜発電所地下構造評価について、平成 27 年 7 月 31 日（大津裁判、乙 C 第 35 号証).

[9] Priest, S.D. and J. A. Hudson、Discontinuity spacing in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 13, 135-148, 1976.

[10] 杉本卓司、RQD と弾性波速度、地質工学、第 11 輯、91-96 頁、1979.

[11] 渡辺俊樹・佐々宏一、亀裂岩盤の RQD と P 波速度との関係に関する数値シミュレーション、資源・素材学会誌、106、No.6、331-335 頁、1990.

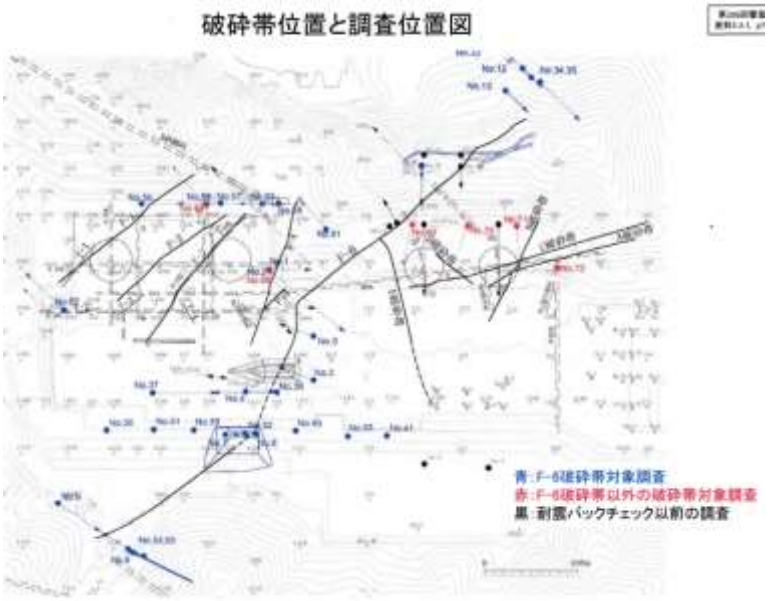


図 1．破砕帯の位置.
F-1～F-6、f-1～f-4、A～E の 15 本の断層破砕帯が確認されている.
走向は概ね南北方向．[3、79 頁]を引用.

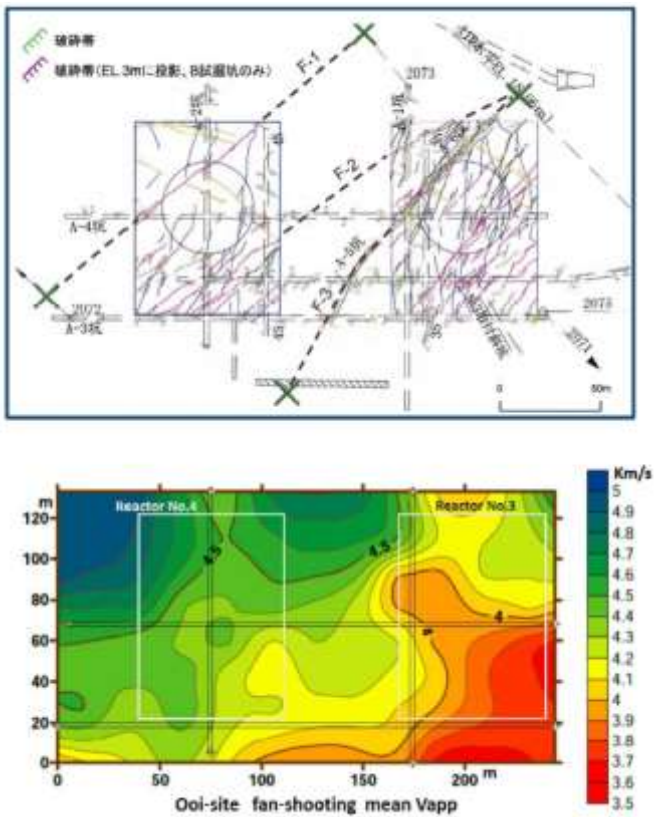


図 2．原子炉建屋基礎における断層破砕帯に伴うシームの分布と P 波速度分布.
北西側から南東側にシームの分布密度の増加（RQD 低下に相当）傾向と
P 波速度の減少傾向とが類似している．[3、27 頁]および[1、図 10].

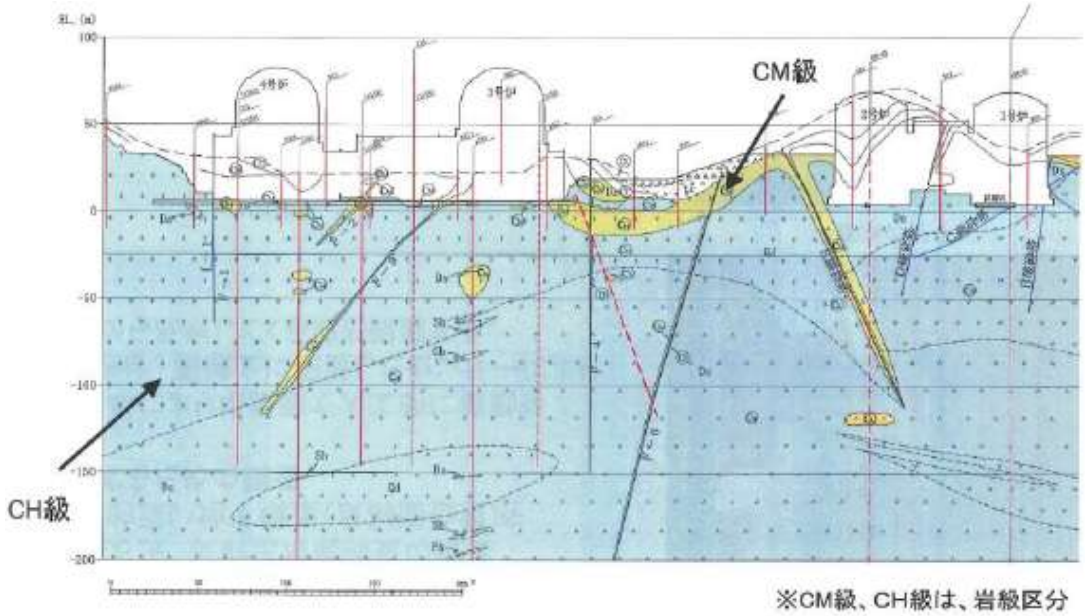


図 3．地質断面図（岩級区分）．大部分が CH 級と表示されている．[2、図表 6]

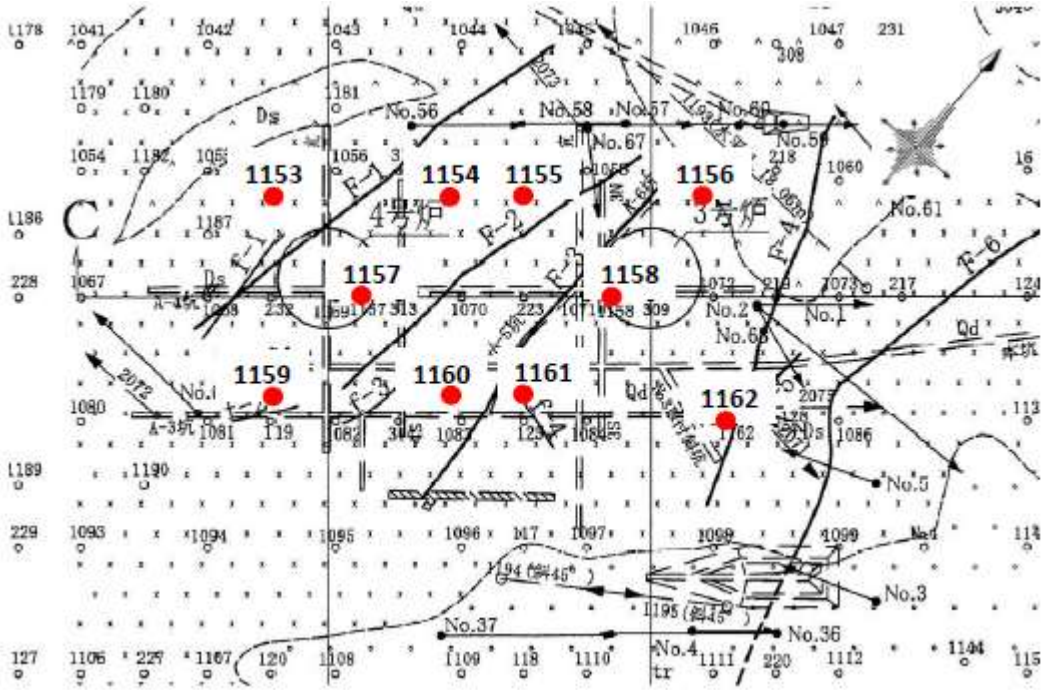


図 4．ボーリング孔の位置．No.1157 孔は 4 号炉の、No.1158 孔は 3 号炉の直下．
太実線：断層破砕帯 f-1～f-4 および F-1～F-6.
[7、6-3-582 頁、第 3.5.26 図を引用加筆]

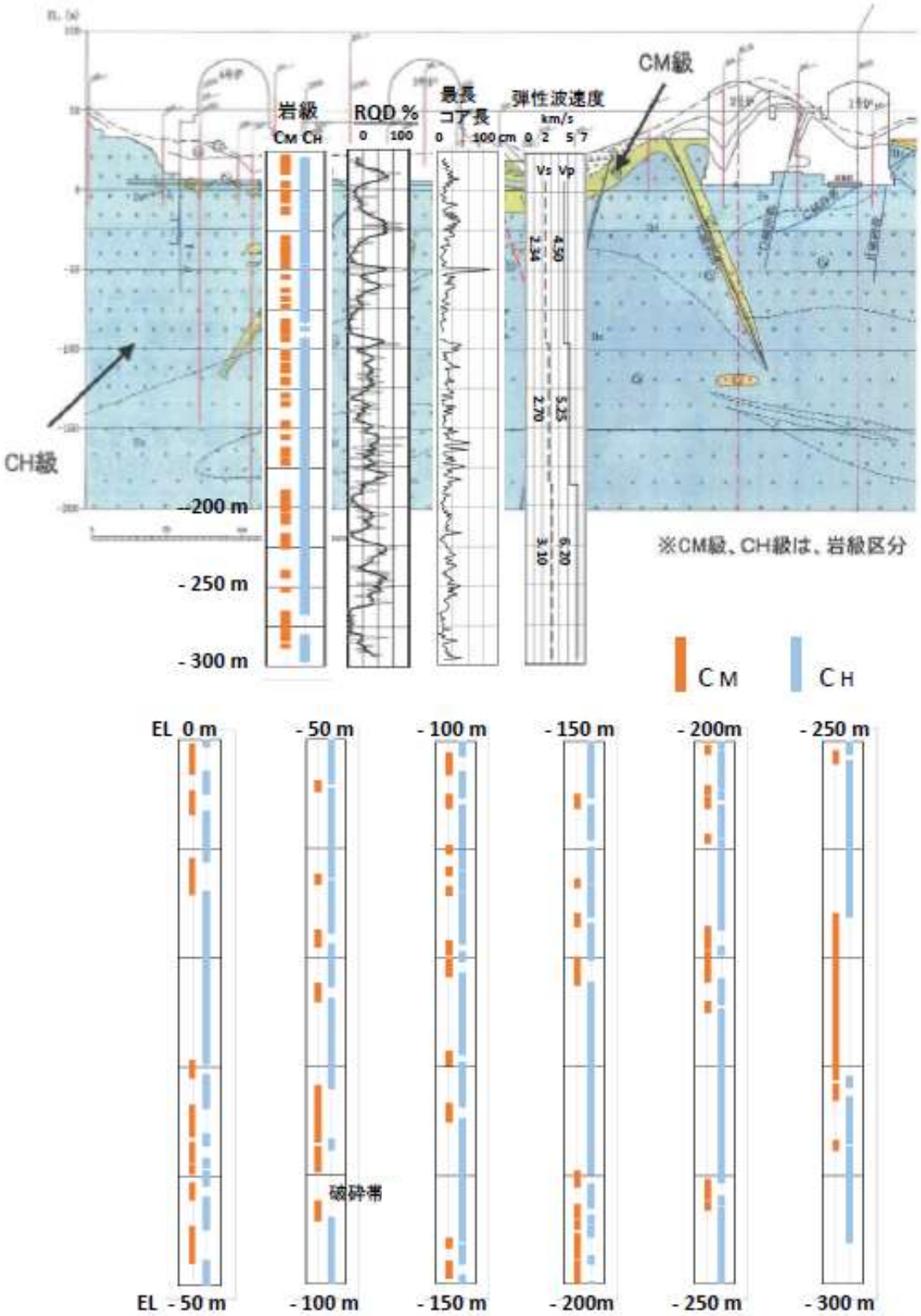


図 5．4 号炉直下の No.1157 孔の岩級、RQD、最長コア長、地震波速度の分布．

全体の 27.9%が CM 級である．岩級、RQD、最長コア長の分布傾向は概ね調和的．EL -90m の破砕帯付近は CM 級で RQD=0． CM 級岩の区間（EL -190～-200m、-220m 付近および -265～-280m）は RQD=0 であり、亀裂増加による岩質の脆弱化、地震波速度の低下が示唆される．

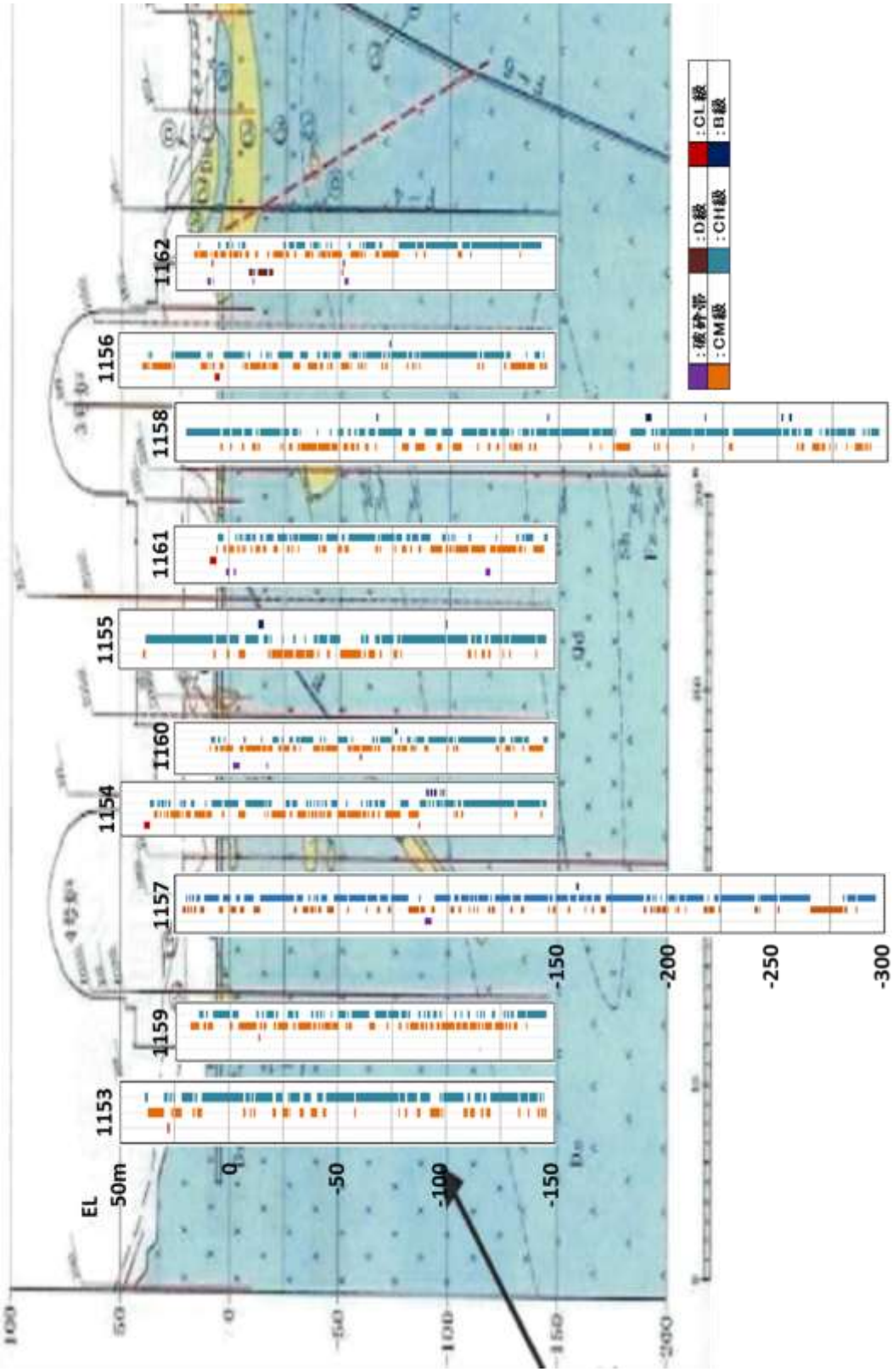


図 6．岩級区分の分布．深部まで脆弱な CM 級が存在する．
CM 級が集中する深さは、ボーリング孔によって異なる．

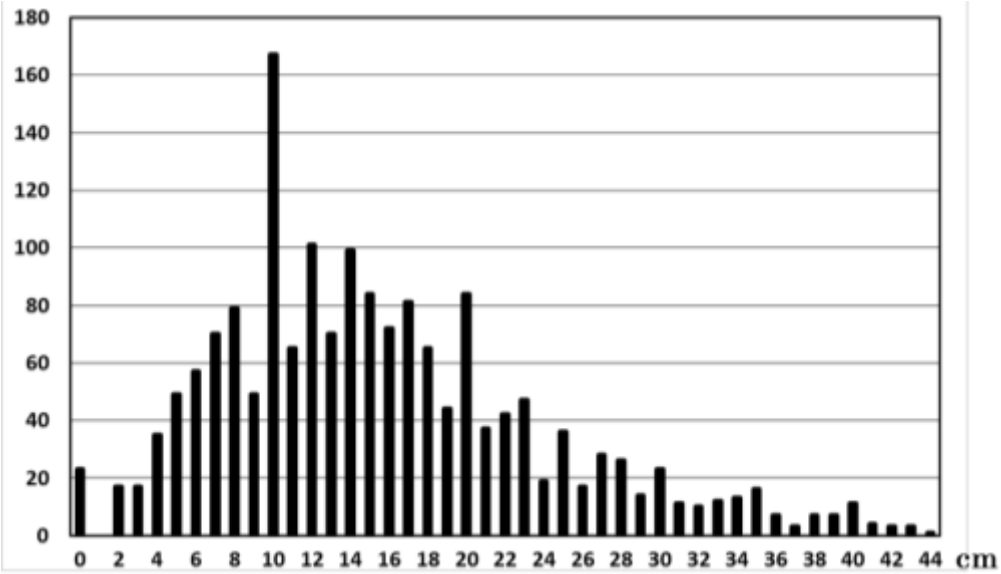


図 7．最大コア長の頻度分布（標高 0m 以下の全データ、N=1,757）．
図枠外の 45cm 以上に 32 個、最大 90cm．全データの平均値は（16.3 ± 10.1）cm.
10cm、20cm など切りのよい値は多く数えられる傾向にある．
全体の 56%（982 個）が 15cm 以下である．

図 8．次頁に掲載.

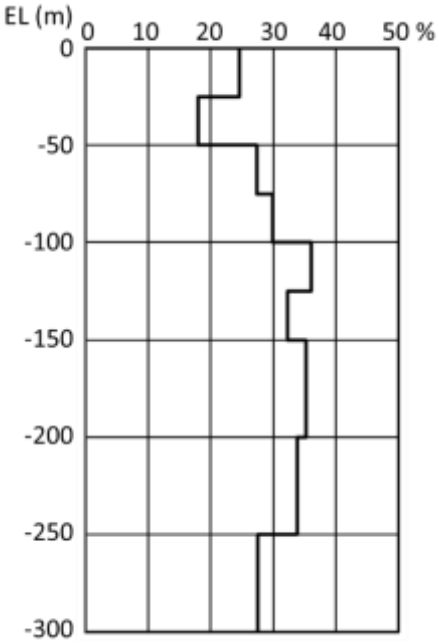


図 9．RQD 平均値の深さ分布．EL-100～-125m 以深で減少．

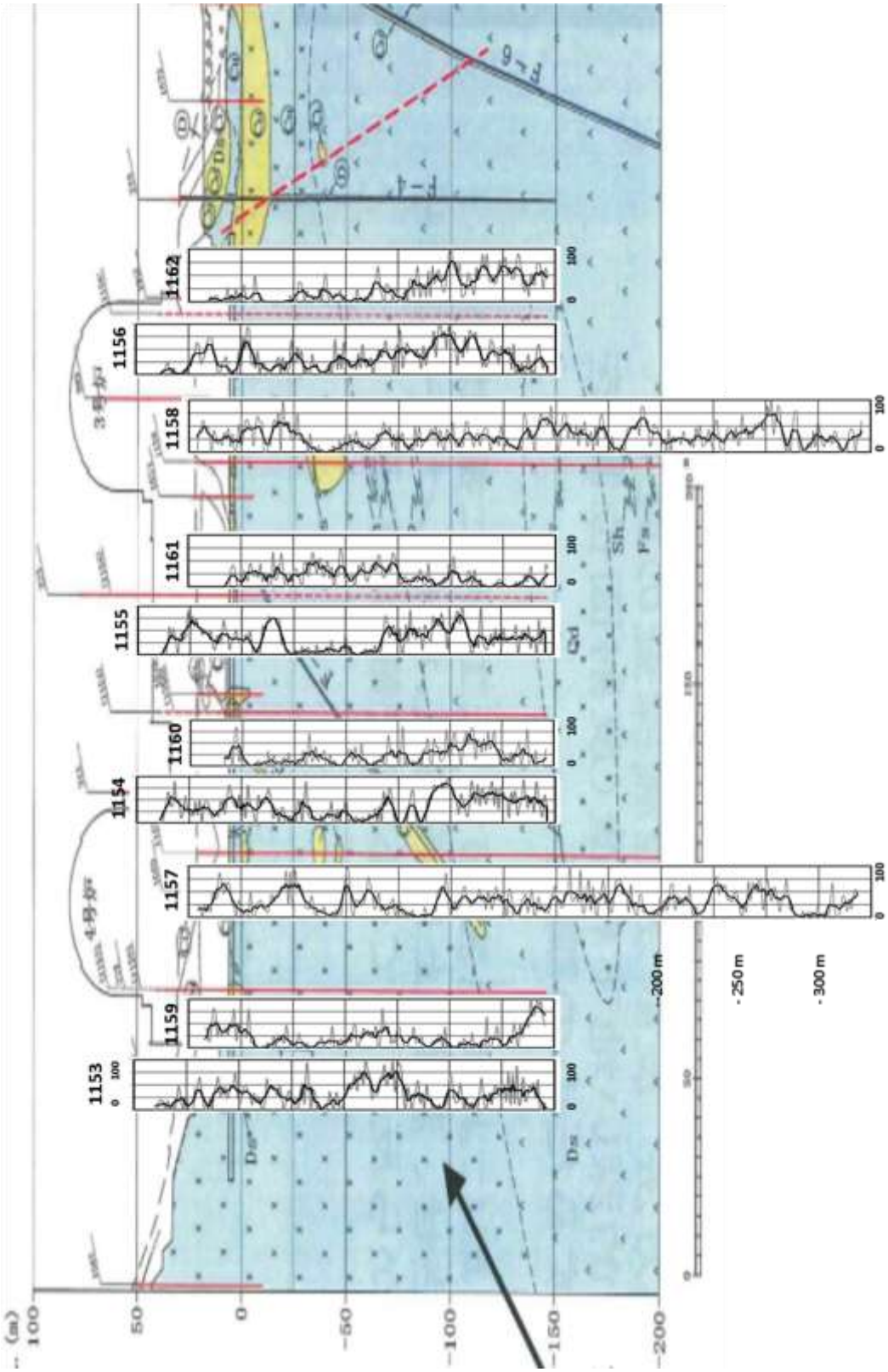


図 8. RQD の分布. 細線：元資料の 1m 毎の値. 太線：5m 区間での移動平均値.
RQD が 25%以下の層が深部に及んでおり、その深さはボーリング孔の
位置によって異なる.

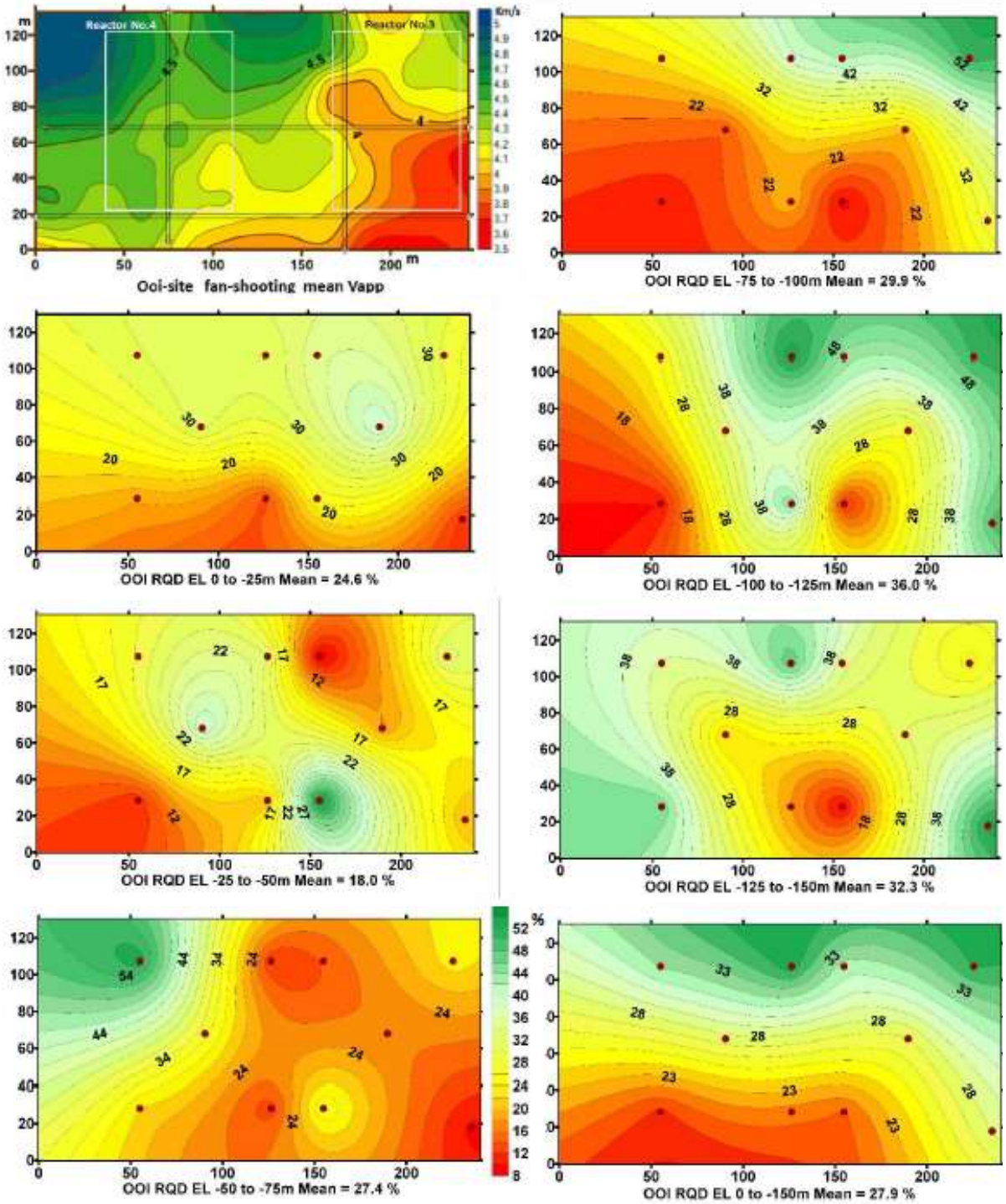


図 10．深さ 25m 毎の RQD 平均値によるコンター図.
左上から右下に標高 0m から-150m へ深くなる．彩色表示のスケールは共通.
図中の数値は RQD 値、茶色の点はボーリング孔の位置.
最左上：試掘坑 P 波速度の分布（図 2 の下図再掲）.
最右下：標高 0～-150m 全体の平均値による（表 3 上の値のコンター図）.

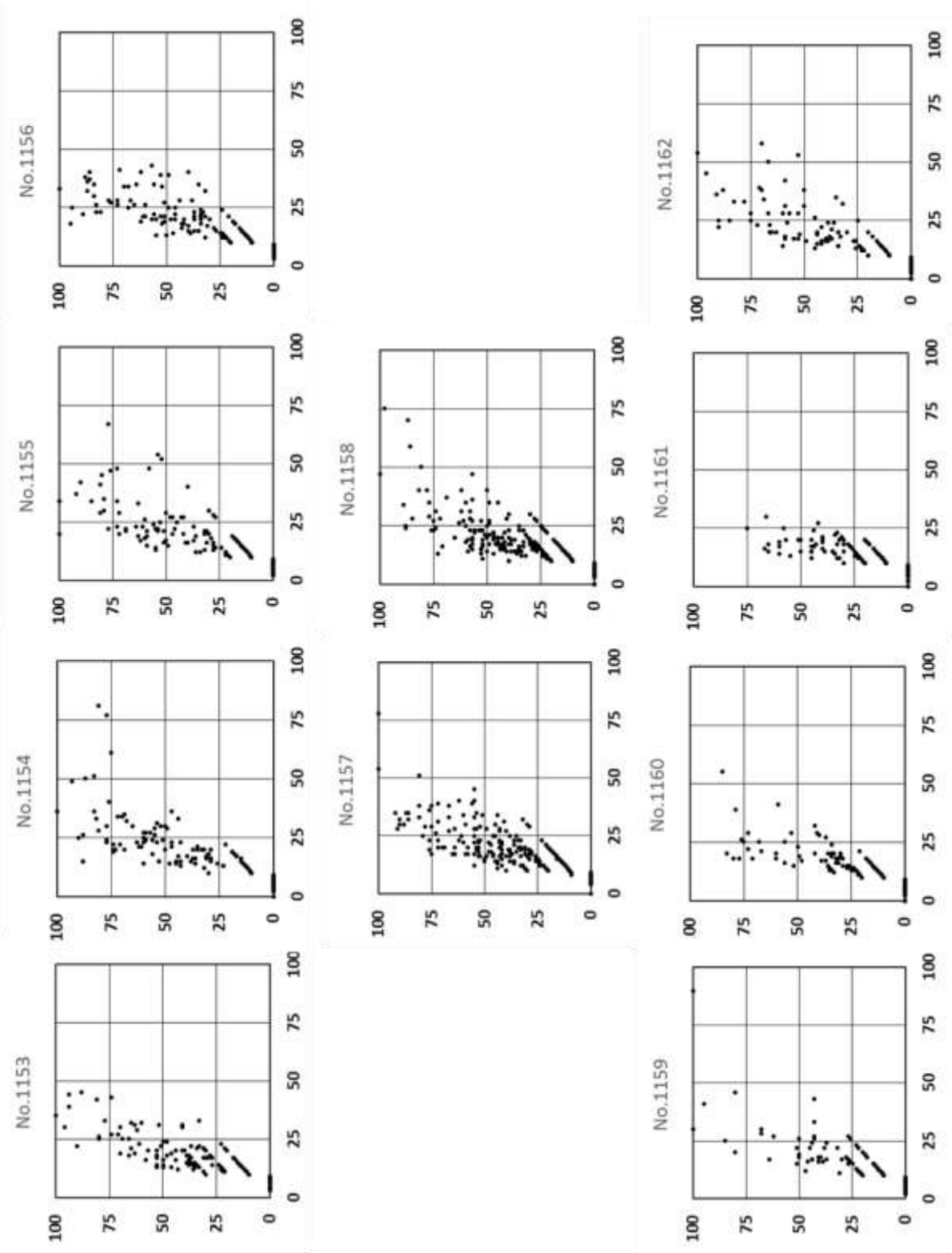


図 11. 各ボーリング孔における最大コア長と RQD の関係（標高 0m 以深のデータ）.

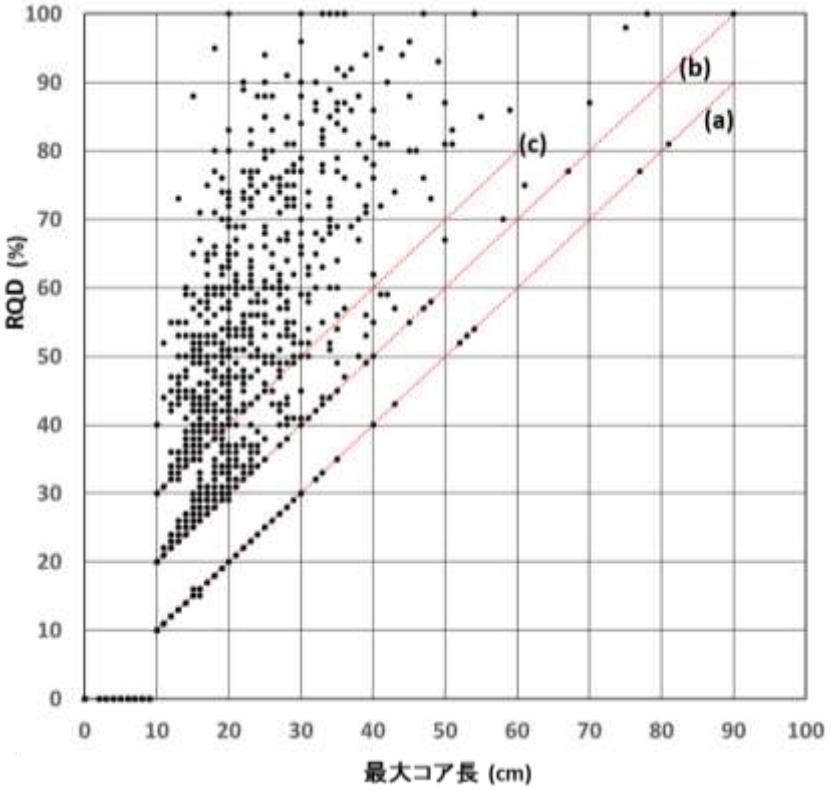


図 12. 最大コア長と RQD の関係. 標高 0m 以深の全データ
赤点線は採取されたコアの数を示す：
(a) 最大コア長のみ、(b) 最大コア長と 10cm 長 1 本、
(c) 最大コア長と 10cm 長 2 本、あるいは
最大コア長が 20cm 以上の場合は最大コア長と 20cm 長 1 本.

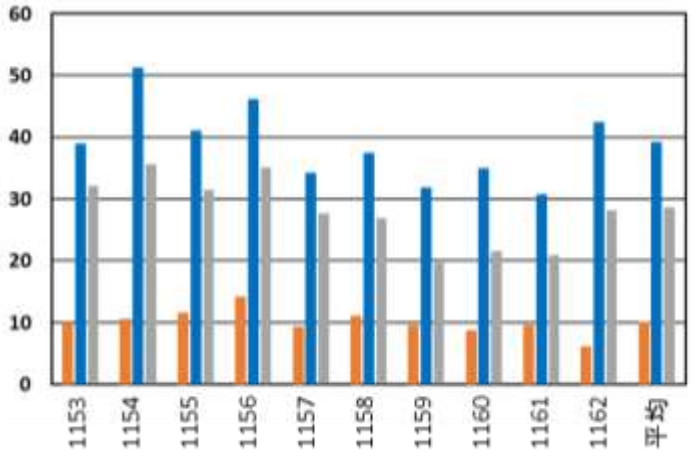


図 13. 岩級区分別の RQD.
橙：CM 級以下の岩盤、青：CH 級以上の岩盤、灰：全体.
CM 級以下の平均値は 10.0%、CH 級以上の平均値は 39.1%.

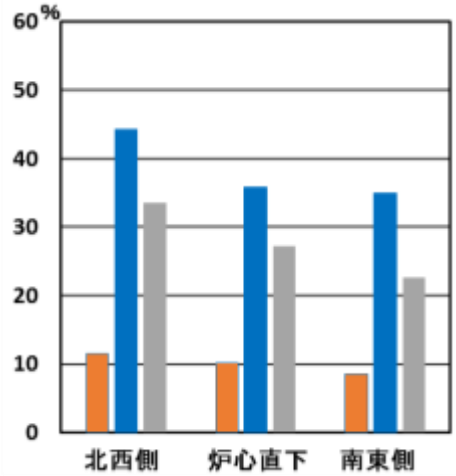


図 14．RQD 平均値のボーリング孔の位置による変化.
橙：CM 級以下の岩盤、青：CH 級以上の岩盤、灰：全体.
北西側から南東側へ低下し、亀裂の増加、岩質の軟弱化がみられる.

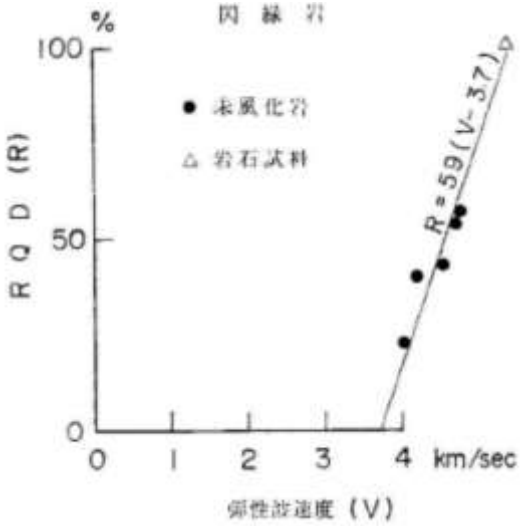


図 15．閃緑岩における
RQD と P 波速度の関係.
△：岩石試料の速度
●：未風化の岩盤の速度.
RQD と P 波速度に直線的な
関係がある．[10、図-1A を引用]

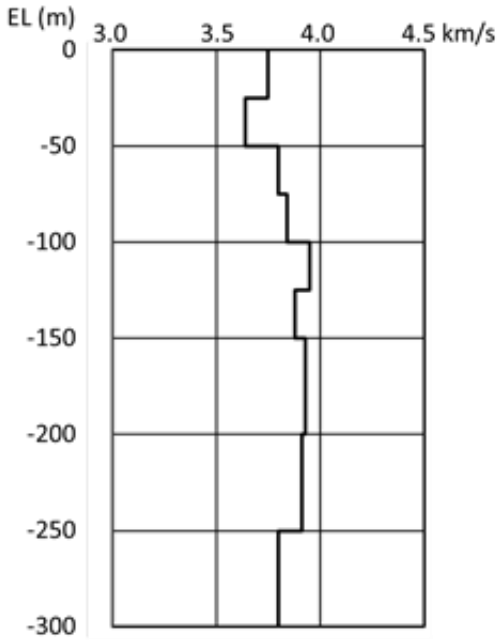


図 16．RQD の深さ変化に対応する
P 波速度の深さ変化.
（図 15 の閃緑岩の比例関係による）.
岩石資料：Vp=5.03km/s.
RQD の深さ変化は図 9 参照.

孔　番	D級	CL級	CM級	CH級	B級	破砕帯
No.1153			22.5	77.5		
No.1154		0.3	36.7	60.1	2.9	
No.1155			32.0	66.0	2.0	
No.1156			33.8	65.8	0.4	
No.1157			27.6	70.4		2.0
No.1158			36.7	62.5	0.9	
No.1159		0.3	52.7	46.9		0.1
No.1160		0.6	46.1	50.3	0.7	2.4
No.1161			44.7	53.3		2.0
No.1162	6.3	0.6	33.5	58.2		1.5
平均	0.6	0.2	36.6	61.1	0.7	0.8

(1) 標高 0～-150m区間の岩級分布（%）

孔　番	D級	CL級	CM級	CH級	B級	破砕帯
No.1157			26.1	73.2	0.7	
No.1158			19.4	77.3	3.4	
平均			22.8	75.3	2.1	

(2) 標高 -150～-300m区間の岩級分布（%）

孔　番	位　置	CM級以下	CH級以上
No.1153～1156	北西側	31.3	68.7
No.1157～1158	炉心	33.1	66.9
No.1159～1162	北東側	47.7	52.3

(3) 岩級分布のボーリング位置による違い（%）

表 1．岩級区分層の占める比率（%）．
(1)：各ボーリング孔、標高 0～約-150m 区間.
(2)：No.1157、1158 孔、標高-150～約-300m 区間.
(3)：ボーリング孔の位置による変化（標高 0～-150m 区間）．

孔 番	標高 0～約-150m区間
No.1153	16.6 ± 8.7 (146)
No.1154	18.5 ±12.6 (146)
No.1155	17.9 ±11.6 (146)
No.1156	18.8 ± 9.3 (146)
No.1157	16.6 ± 9.9 (146)
No.1158	15.7 ± 8.7 (150)
No.1159	13.6 ±10.2 (146)
No.1160	13.3 ± 8.2 (146)
No.1161	12.5 ± 5.7 (146)
No.1162	16.2 ± 1.7 (146)
平 均	16.0 ±10.0 (1,464)

(1)

孔 番	標高 約-150～-300m区間	標高 0～約-300m区間
No.1157	17.6 ± 9.4 (147)	17.1 ± 9.6 (293)
No.1158	17.9 ±11.1 (146)	16.8 ±10.0 (296)
平 均	17.7 ±10.2 (293)	16.9 ± 9.8 (589)

(2)

孔 番	位 置	標高 0～約 -150m区間
No.1153～1156	北西側	18.0±10.7 (584)
No.1157～1158	炉 心	16.2± 9.3 (296)
No.1159～1162	南東側	13.9± 9.3 (584)

(3)

表 2. 最大コア長の平均値.

(1)：各ボーリング孔における平均値 (cm) (データ数) 標高 0～約-150m 区間.

(2)：No.1157、1158 孔、深部における平均値.

(3)：ボーリング孔の位置による変化（標高 0～-150m 区間）.

孔番	孔口標高 (m)	孔長 (m)	RQD平均値 (%) (データ数*)
No.1153	40.85	186.90	32.1±26.0 (147)
No.1154	40.05	186.10	35.6±29.0 (146)
No.1155	39.96	186.00	31.5±27.2 (147)
No.1156	39.98	186.00	35.1±26.5 (147)
No.1157	21.47	317.50	27.6±23.3 (146)
			# 29.9±23.7 (294)
No.1158	22.31	318.40	26.9±22.0 (146)
			# 30.2±23.2 (296)
No.1159	25.28	171.30	19.7±22.6 (146)
No.1160	9.72	155.80	21.6±23.0 (147)
No.1161	9.66	155.70	20.9±18.9 (147)
No.1162	16.62	162.70	28.1±26.8 (147)
		* 標高 0～約－147m の範囲の平均値	
		# 標高 0～約－295m の範囲の平均値	

(1)

深さ(標高 －m)	RQD平均値 (%) (データ数)	孔 番
0～150	28.0±25.3 (1,474)	No.1153～1162
150～300	32.4±23.8 (290)	No.1157,1158
0～300	28.7±25.1 (1,764)	No.1153～1162

(2)

深さ(標高 －m)	RQD平均値 (%) (データ数)
0～25	24.6±24.4 (250)
25～50	18.0±20.3 (250)
50～75	27.4±23.0 (250)
75～100	29.9±27.3 (250)
100～125	36.0±26.2 (250)
125～150	32.3±26.1 (210)
150～200	35.2±24.5 (100)
200～250	33.8±20.4 (100)
250～300	27.5±26.0 (90)
150～300mはNo.1157孔,No1158孔のみ	

(3)

孔 番	位 置	RQD平均値 (%) (データ数)
No.1153～1156	北西側	33.6±27.2 (587)
No.1157～1158	炉 心	27.8±22.9 (300)
No.1159～1162	南東側	22.6±23.2 (587)
	標高 0～約 -150m の範囲の平均値	

(4)

表 3. RQD 平均値.

(1) : 孔毎の平均値. No.1157 と No.1158 は EL -295m までの平均値も記してある.

(2) : 深さを 2 分した平均値. 標高-150m 以浅は 10 本、以深は 2 本の平均値.

(3) : 標高-150m 以浅は 25m 毎、以深は 50m 毎の平均値. 深部で低下.

(4) : 場所による変化. 北西側から南東側へ系統的に低下.

孔　番	CM級以下	CH級以上	全　体
No.1153	9.9±15.3	38.9±24.7	32.1±26.0
No.1154	10.5±15.3	51.2±24.3	35.6±29.0
No.1155	11.5±19.3	41.0±25.5	31.5±27.2
No.1156	14.2±15.4	46.1±24.5	35.1±26.5
No.1157	9.3±12.5	34.2±23.0	27.6±23.3
	# 9.7±12.5	# 37.2±22.5	# 29.9±23.7
No.1158	11.0±13.2	37.4±21.3	26.9±22.0
	# 11.2±14.0	# 37.5±21.8	# 30.2±23.2
No.1159	9.5±14.8	31.8±24.6	19.7±22.6
No.1160	8.7±12.8	34.9±23.9	21.6±23.0
No.1161	9.5±12.2	30.7±18.2	20.9±18.9
No.1162	6.1±10.5	42.4±24.7	28.1±26.8
平　均 (*)	10.0±14.1	39.1±23.8	28.7±25.1

岩級別のRQD平均値　標高 0～約-147m、#は標高0～約-295m

*: 標高0m以深の全ての値の平均値

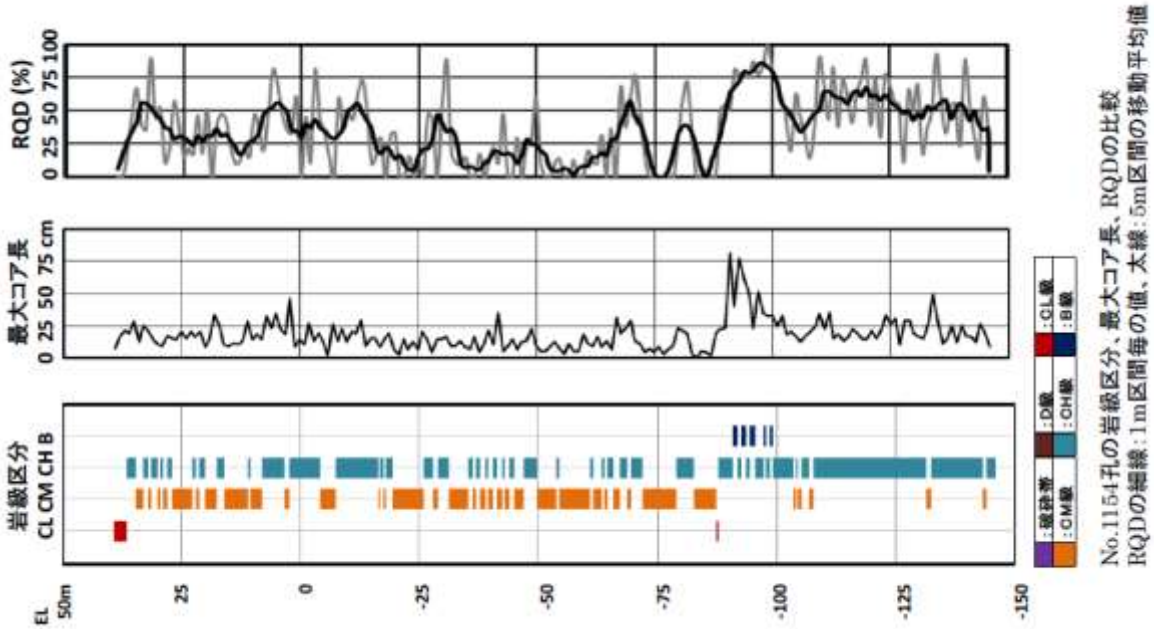
(1)

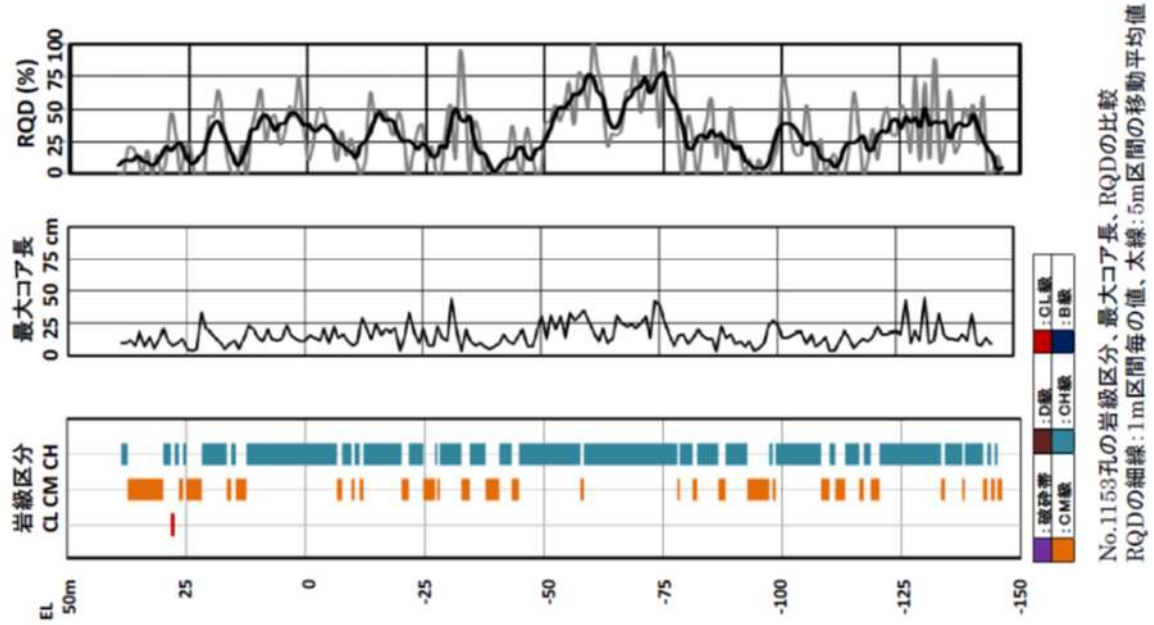
孔　番	位　置	CM級以下	CH級以上	全　体
No.1153～1156	北西側	11.6±16.4	44.0±25.1	33.7±27.2
No.1157～1158	炉心直下	10.2±12.9	35.8±22.2	27.4±23.0
No.1159～1162	南東側	8.6±12.9	35.3±23.4	22.5±23.3

(2)

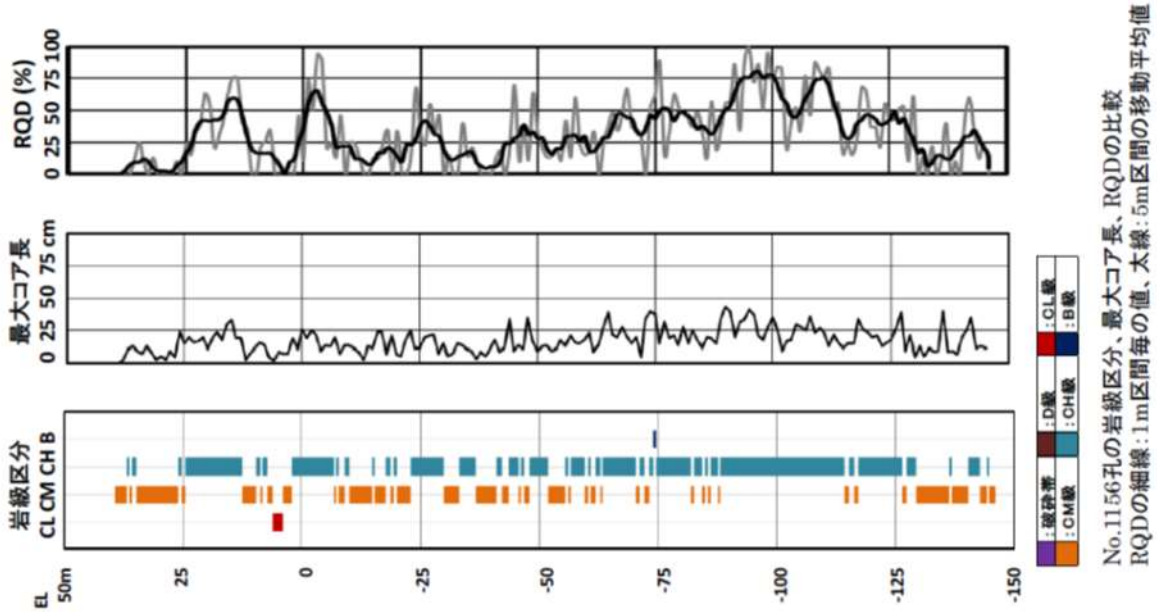
表 4. 岩級別の RQD 平均値（%).
(1)：各ボーリング孔.
(2)：ボーリング孔の位置による変化（標高 0～-150m 区間）.

付 図

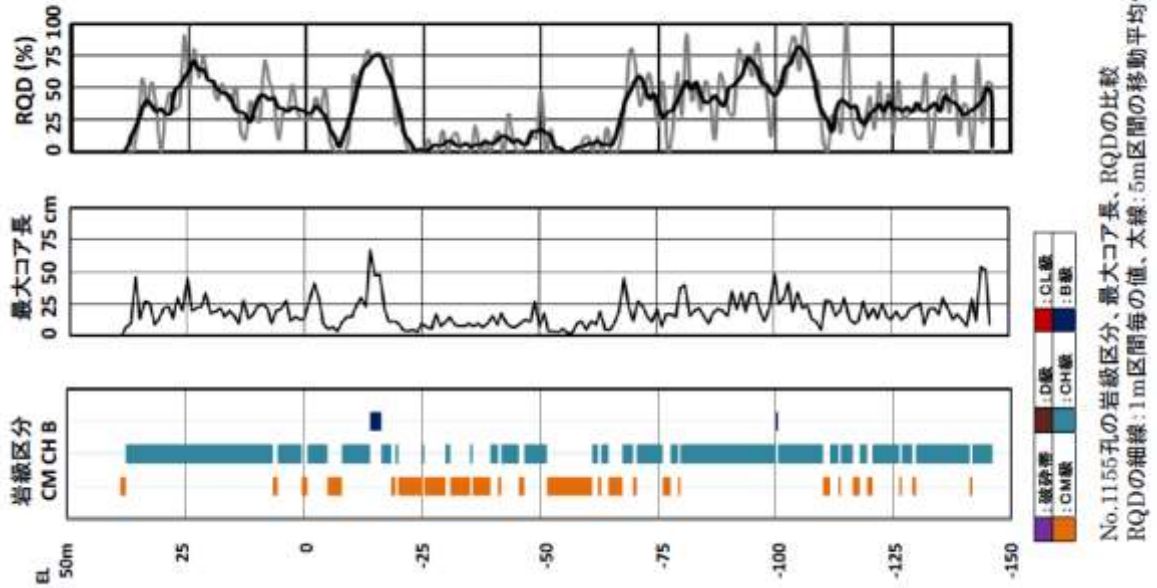




付図 1、2. No.1153、1154 の岩級区分、最大コア長、RQD の分布.

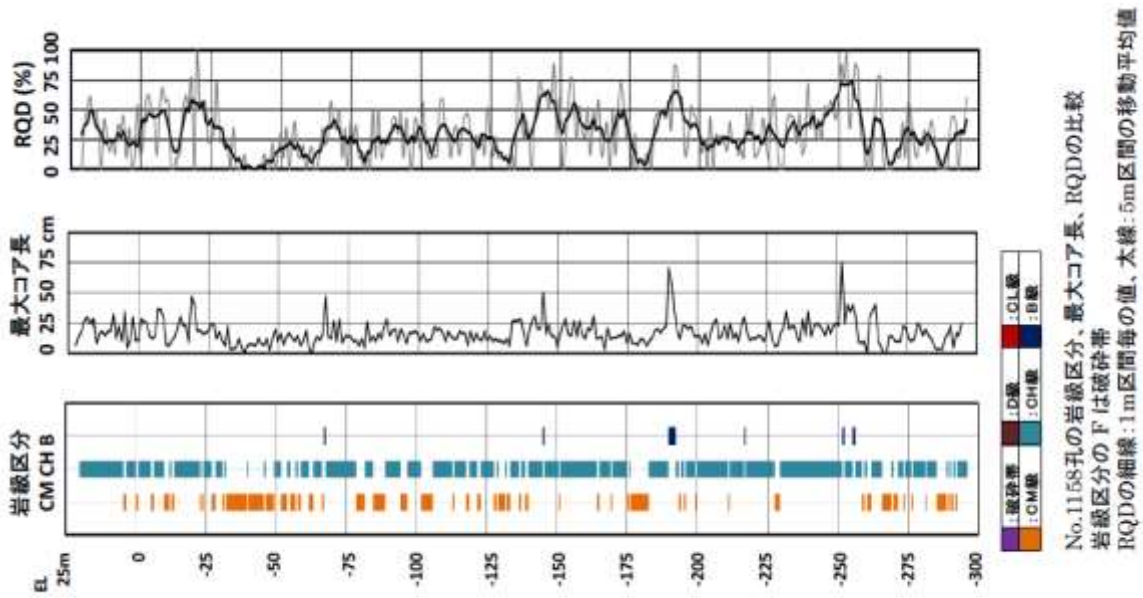


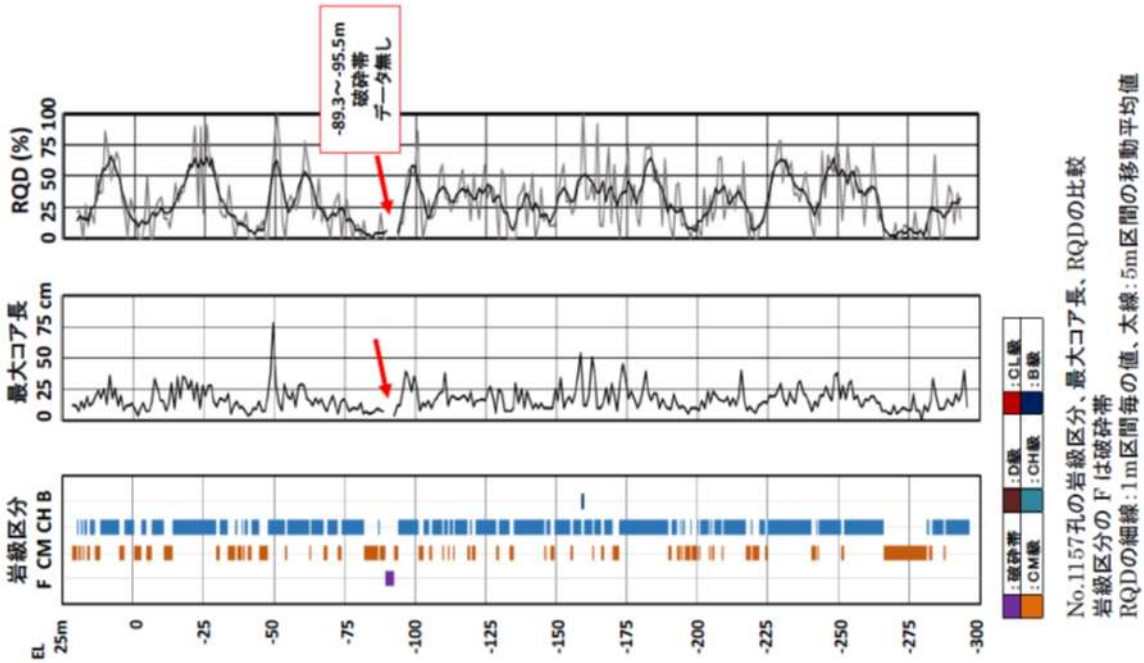
No.1156孔の岩級区分、最大コア長、RQDの比較
RQDの細線：1m区間毎の値、太線：5m区間の移動平均値



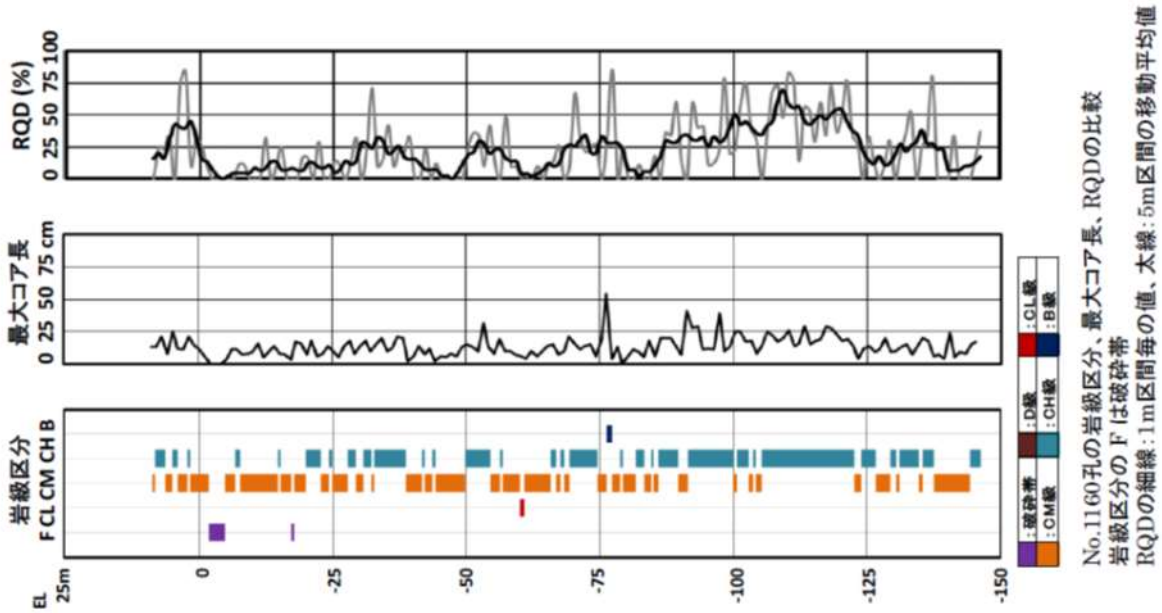
No.1155孔の岩級区分、最大コア長、RQDの比較
RQDの細線：1m区間毎の値、太線：5m区間の移動平均値

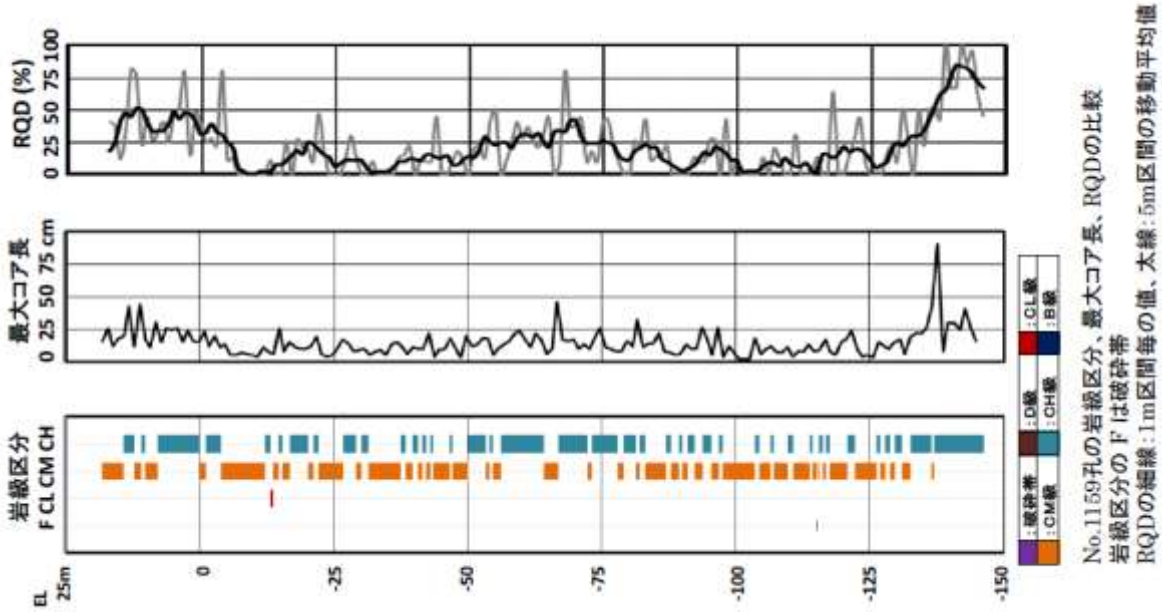
付図 3、4. No.1155、1156 の岩級区分、最大コア長、RQD の分布.



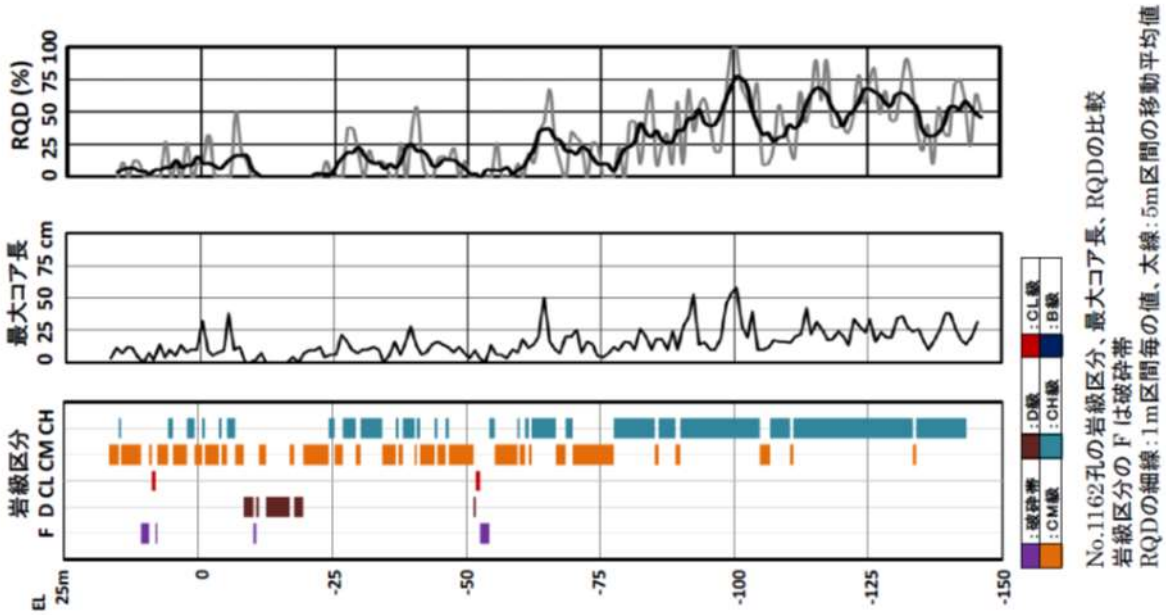


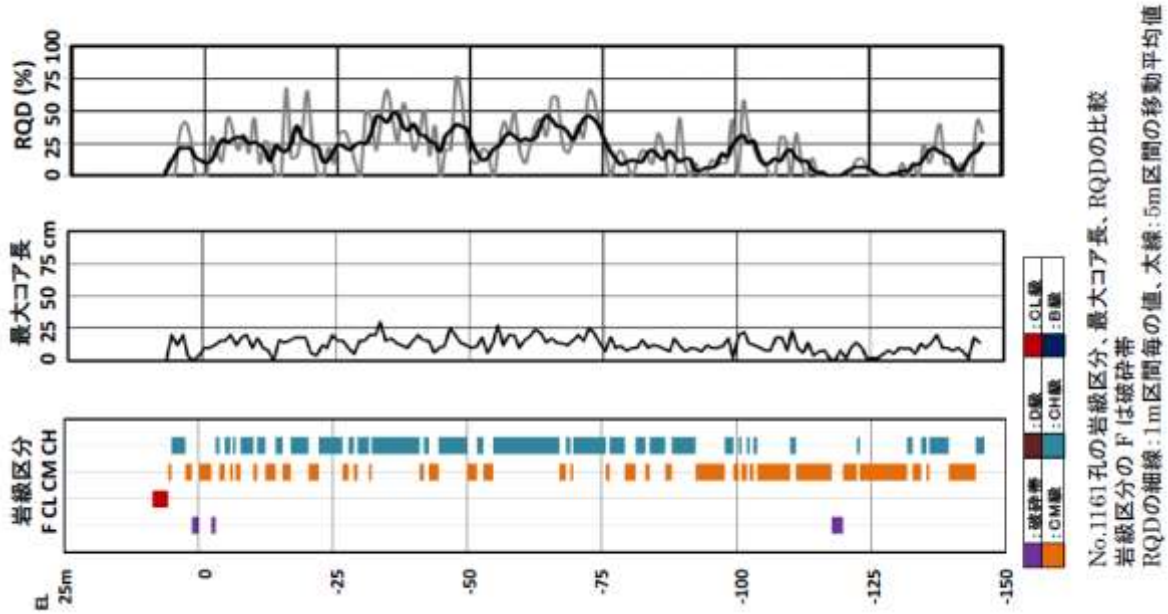
付図 5、6. No.1157、1158 の岩級区分、最大コア長、RQD の分布.



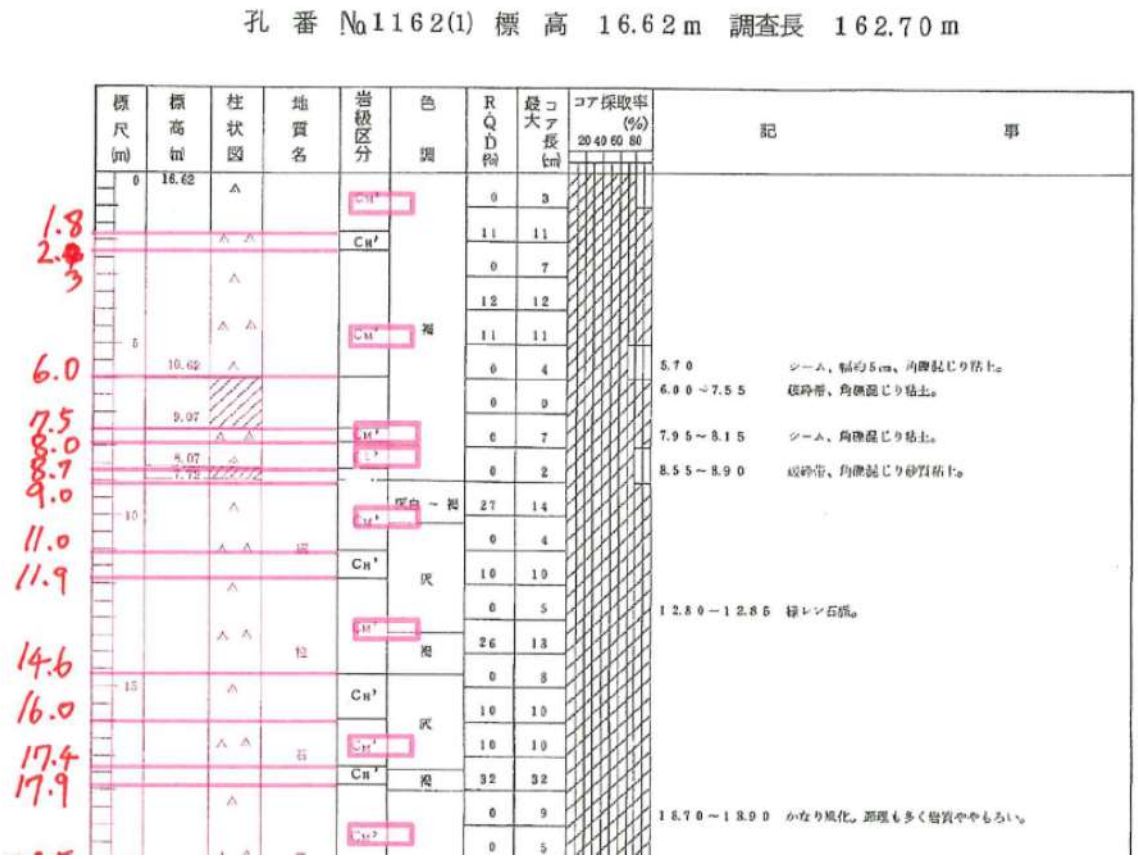


付図７、８．No.1159、1160 の岩級区分、最大コア長、RQD の分布.





付図 9、10．No.1161、1162 の岩級区分、最大コア長、RQD の分布.



付図 11. 柱状図の読み取り手順.

柱状図は 1 頁に 40m 分が記載されている。上図は No.1162 の冒頭部分、

第 1 列：標尺 ＝ 孔口からの深さ(m)、0.5m 刻みの目盛り.

第 5 列：岩級区分、区分境界の深さを標尺まで伸ばし（赤線）、
0.1m 刻みで読み取る（渡辺氏は PC 画面上で赤線記入、読み取り）.

第 7 列：RQD 値(%)、1m 毎の値が記載されているのを読み取る.

第 8 列：最大コア長(cm)、1m 毎の値が記載されているのを読み取る.

読み取った値は、孔口からの深さであるので、孔口の標高（柱状図上部に記載）を用いて標高値に換算.

RQD と最大コア長の読み取りのチェック：記載されている数値は、小さくて読み間違いが生じやすい（3 と 8、5 と 6 など）。図 11、12 の最大コア長と RQD の関係において、プロットされた点の範囲は RQD の定義により限定される。この範囲を外れる値は読み直した。

読み取りと集計・解析は全てのデータについて行い、本稿の議論は標高 0m より深い部分のデータの分析によっている.