

ボストーク湖による氷床ボーリング調査に係る包括的環境影響評価書（全訳）

本年度中にロシア政府から、ボストーク湖の氷床ボーリング調査に係る包括的環境影響評価書が送付される予定であったが、作業が遅れているためか送付されてこなかった。そこで、第24回南極条約協議国会議で提出されたインフォメーション・ペーパーを全訳し、本事業の概要を把握することとした。以下に全訳を示す。

プロジェクト「氷河下にあるボストーク湖貫通に係る生態学的にクリーンな方法の開発とその是非」に対して専門家が出した結論

プロジェクトは、1999年、技術経済産業省により認可されたものであり、その委託を受けた実施機関は、ロシユドロメット（Roshydromet）極地研究所及び教育省のサンクト・ペテルブルク鉱山研究所である。なお、プロジェクトの実施にあたっては、国家生態学専門家調査グループ（state ecological expert examination、以下「SEEE」略す）が次のような条件をまとめており、これらを遵守することが必要である。

1. ボストーク湖貫通の工法については、生態学の見地からの安全性も含めて記述すること。
2. ボーリング孔 5G-1 の掘削及びボストーク湖下層氷河貫通に係る環境影響評価を実施すること。
3. 南極大陸に関する国際合意に従って提出された資料の遵守について検討した結果を提示すること。
4. プロジェクト実施の際に使用される化学物質の特性や遵守事項に関する証明証があること。

全ての資料が SEEE に提出され、作業は 2000 年に完了した。同グループによる結論は、2001 年 3 月 15 日に出来上がり、国内における手続きを経て同年 3 月 26 日に承認された。

つまり、ボストーク湖貫通の工法は、「ロシア南極観測」の枠組みの中で、ロシア国内の規定や手続きに従って公式に認可された。ロシアは、ボストーク湖の調査が極めて重要であることから、CEP 要求事項に従って CEE の最終図書を作成する上で南極条約締約各国から提案や意見を得る必要があると考え、全ての締約国に資料を周知することにした。

1. 国家生態学専門家調査グループ（SEEE）が至った結論

生態学専門家調査に関する国内法に従って、天然資源省の SEEE は、極地研（AARI）から提出されたプロジェクト報告書を精査した。

提出された資料を分析した結果、SEEE は、生態学的な見地からの安全性の確保と環境保全要求に応えるというプロジェクトの目的を認識しつつ、ボストーク湖下層氷河貫通作業の工程に伴う環境影響は許容範囲内であること、詳細設計やプロジェクト実施段階では、「結論」で示された提案事項及び勧告を考慮する必要があること、という結論に達した。

2. 研究実施場所の主な特徴と基礎情報

ボストーク内陸基地は、東南極の氷河原にあり、表面は雪で覆われ、平坦な場所に位置する。海拔は 3488m、緯経度は 78028'S、106048'E である。南極中央部の気候帯に見られるように、基地の特徴は、極めて気温が低いこと（年平均 -55.40°C 、最低 -89.20°C 、最高 -13.60°C ）、気圧が低いこと（年平均 624.2mb）、相対湿度が低いこと（年平均 71%）である。また、風速に関する特性としては、年平均風速が 5.4m/s と弱いカタバ風（斜面下降風）に区分され、まれに嵐の時は

最大 32m/s である。このように気象条件が厳しいことから、融雪することはない。雪や氷の結晶（年間 2.2g/cm² 積もる）などの降水物はよく漂流し、結果として、障害物（建物）の背後に雪が積もる。基地周辺は雪で覆われた平地で、高さ 20cm 程度の雪が積もり緩やかに傾斜している。

深度 3310–3370m の範囲においては、氷層中に構造不整合を示す指標がいくつか出ている。深度 3460–3538m の範囲においては、細かい氷の層と粗い氷の層が重なる部分が観察されている。ボーリング孔の底部（3623m）までトレースできた 3538m より下層の氷層は、巨大な粗氷から構成されている（氷晶は直径 1m 以上）。

ボストーク基地付近の湖の上にある氷床は南東方向へ流れている。深度 3460–3540m 及びそれ以上の部分では氷層は動いており、氷河表面でのその速度は 1 年に約 3m である。

リモートセンシング技術を用いて、ボストーク基地周辺の面積 10,000km² 以上もある下層氷河湖及び最大深度 700m の水の層を調査した結果、湖の規模は 220×70km であった。また、地震データによると、湖上の氷の厚さは 3700–4200m である。水の下に貯まった堆積物の厚さは、おそらく最大 330m である。ボストーク基地付近における氷河の表面は高さ 3488m に相当し、氷床の厚さは 3750m である。従って、氷河の底辺の部分は海面下 262m ということになる。湖水は、淡水の可能性があると考えられており、このことは、そこに生命が存在する可能性を示すものである。湖は 500ka (50 万年) 以上前に形成されたと推定される。ボストーク基地で深度 3623m まで行った氷床ボーリング及び採取したアイスコアの研究により、400ka (40 万年) 以上に渡る期間に、4 つの気象サイクルがあったことなど、地球規模の気象変動に関する非常に重要な知見が得られている。全期間における大気中のガス (CO₂、CH₄) 組成の変化及び様々なエアロゾル濃度の挙動を再考させる結果であった。

ボストークで長い間行われてきた地球物理学、氷河学、古気候学、微生物学の各分野における研究の結果、世界的にも興味深い科学的成果がたくさん得られている。また、様々な問題を解決する上でも優先順位の高い結果が得られている。

第 13 次南極観測隊 (SAE、1967 年) 以降、ボーリングの技術者 (Chair of Technology and Technique of Drilling Boreholes) や SPSMI の科学者たちは、AARI の科学者と一緒に、ソビエト南極観測隊（後にロシア南極観測隊に名称を変更）の夏隊及び冬隊の両方に参加している。ボストーク基地、ミルニー観測所、ミルニーボストーク-1 プロファイル (Mirny-Vostok-1 profile)、及びセベルナヤゼムルヤークペラゴ (Severnaya Zemlya archipelago) の氷河で、18000m 以上の氷床深層掘削を行った。ボストーク基地で氷床深層掘削を開始したのは、第 35 次南極観測隊 (1990 年) からであり、その方法は TELGA や TB3S タイプのドリルを使用したサーマル工法であった。第 38 次南極観測隊 (1993 年) では、ボーリング孔 5G-1 が深度 2755m まで達した。第 39 次南極観測隊では、資金不足・技術・組織上の問題からボストーク基地は一時的に閉鎖され、掘削作業は行われなかった。第 40 次南極観測隊 (1995 年) では、ボーリング孔 5G-1 の掘削作業は、電気ドリルを用いて深度 2755m から再開し、第 43 次南極観測隊 (1997–1998 年) では、ボーリング孔は深度 3623m に達した。これは、より好条件であるグリーンランドで行われた EC 諸国 (3032m、2953m) や米国 (3057m) が達した最大深度よりも約 600m 上回る。EC の専門家による掘削は、事故により上記のような深度で休止となった。過剰な圧力を緩和するため、EC の専門家は、ロシア南極観測隊と類似した掘削液を使用する。その組成は航空燃料の JP-8 型を主成分とし、Freon F-141b のフィルターを使用する。ドーム C では、ヨーロッパの事業として深層掘削「EPICA」が同じ掘削液を用いて進められており、2001 年 2 月 1 日には深度 1450m に達した。

5G-1 のボーリングの結果から、ロシアの氷床深層掘削工法が非常に優れていることが証明されたといえる。すなわち、米国の CRREL、デンマークスウェーデンの ISTUK、日本製掘削機などの他の氷床深層掘削用電気機器と比較して、ロシア製 KEMS-112 は設計の平易性、操作の信頼性の点で異なる。

ポストーク基地におけるボーリング孔及び 5G-1 からの継続的に採取したアイスコアの研究により、その年代は 50 万年以上であることがわかった。また、次のような重要な情報が得られた。

- ・ ロシア (AARI、RAS 地理研究所)、フランス (国立研究センターの氷河・地球物理学研究室)、米国 (マイアミ大学) の科学者による氷床深層に係るアイストープの研究の結果、地球の気象変動のサイクル論が初めて確立され、4 つの氷河期・その間の期間についても明らかになった。
- ・ 氷床深層から無菌状態の微生物をサンプリングする方法が開発され、20 万年以上にわたる微生物の活動停止状態を発見、証明された (SPSMI、RAS 微生物研究所及び AARI との共同)。
- ・ 覆っている氷河の温度変化に関する情報が初めて得られ、氷河における熱移動の数学モデルの基礎として利用された。
- ・ 深度別に垂直方向の層変成や氷の変成作用の特徴について確立された。

熱学的、幾何学的な氷の破壊 (ice failure) の理論及び、掘削する上での技術的なパラメータを計算する方法の基礎を確立した。過圧力によるボーリング孔収縮の防止及び、深度に伴う粘性-塑性の変化による温度上昇を防ぐ不凍掘削液の選択方法を実証した。基本的に新しく、ケーブルとつながっている半自動電気-サーマルドリル (AARI との共同) と電気-メカニカルドリル (TELGA、TB3S 及び KEMS) という固定式と移動式を複合させたドリル機器と、掘削プロセスコントロールシステム及び自動オペレーションを開発した。また、南極氷河の厳しい条件のもと、ボーリング孔について地球物理学研究を複合させた特別な方法及び装置を開発し、テストをおこなった。

ポストーク基地周辺では、1957 年から環境に対する人為的な影響が生じている。様々な研究を行うために、基地では季節によって 14~25 人を収容することができる。100kW のディーゼル発電機は 5 つある。1970 年以降、直径 15~18cm、深さ 500~3623m の 5 つのボーリング孔が掘削されてきた。基地付近における生活廃棄物による汚染、水源近くにおける油による氷の汚染などが確認されている。現在のところ、ボーリングは、プロジェクトとの関係で、4 人からなるチームにより行われている。現実かつ経済的な面 (新しく掘削するために必要な物資や組織) から考えて、AARI や SPSMI は、ポストーク湖に到達するために既存の 5G-1 を利用すること、生態学的に安全な技術や特殊機器を利用することを提案している。本プロジェクトを実施する上で、ポストーク基地にある関連施設は次のとおりである。

- ・ 掘削棟を含む一連の掘削施設
- ・ 採取した氷床深層の研究のために施設等を装備した氷河学研究室
- ・ 0℃以下で長期間保存できる氷床深層貯蔵施設
- ・ 生活施設及び付属施設

近い将来、湖に貫通し、水理学・微生物学・地学の各分野の研究が行われる予定である。ただし、貫通については、国際規約やロシア国内の規約に照らし合わせて、生態学的な安全性を確保するための必要事項を満たした形で実施されなければならない。

湖の底質や水の分析から得られる情報は、湖の形成過程だけでなく現状も明らかにする上で価値がある。また、これらの情報は、リモートセンシング研究やモデル計算の結果と比較検討、さらにはこれらの手法論の改善にも役立つであろう。

3. ポストーク湖に達する工法について

ポストーク湖への貫通の手法については、各国からいくつか提案が出ている。しかし、これらの全ては氷河層を 3000m 以上も予備的に掘削する方法である。現在、ボーリング孔 5G-1 の底は湖の表面間近である。従って、この 3623m のボーリング孔を使い掘削液を満たして貫通する方法は、かなり論理的であると考えられる。

貫通の際に生態学上必要な事項を全て満たすために、事業者は掘削方法についていくつか変更することを提案する。

30年以上にわたる掘削技術者の経験により、オゾン層への影響を回避する点及び微生物学の見地から、生態学的にクリーンな掘削手法をテストし発見することができた。

ポストーク湖へ達する手段として現在提案されている方法は、第一にポストーク湖の氷床の物理特性を利用するものである。氷床は、「氷-水」の境界で氷のカラムの重さ（以下、氷荷重圧という）に応じた圧力がかかっている流動状態にある。掘削時においては、ボーリング孔内の掘削液による圧力は、氷荷重圧と同じである。掘削液の量を減らすことで、氷荷重圧を減らすことができる。つまり、ある点において湖の水圧が掘削液によるカラムの圧力を上回るような状態を作る、ということである。

このような条件のもとでは、ボーリング孔が湖水の表面に達する際、掘削液は氷荷重圧の不足分の高さまで湖水の水圧で押し上げられるような状況になると考えられる。掘削液が疎水性であり、かつ水よりも軽いことから、掘削液の湖への浸透は生じないと考えられる。ドリルは、湖水の表面に達したらすぐにボーリング孔から引き上げられる予定である。ボーリング孔から上がってくる湖水は明らかに凍るはずである。凍結後は、湖水が凍った部分を再度掘削することになる。下にある湖の水からできていた氷は、ボーリング孔の底と湖に二分している。つまり、それらの接触を防いでいる。従って、この方法を用いると、ドリルやサンプリング機材を直接湖に入れて測定しないで湖水をサンプリングすることができる。

この方法及び研究は、何段階かに分けて、2種類のドリルと掘削液を使用する計画である。

第1段階の作業は、電気掘削機 KEMS-132 及び以前この場所で使用していた掘削装置を用いて、さらに 100m 程度掘り下げる。この装置の効率性の高さと信頼性はすでに証明されており、その使用については生態学的に完全に安全といえよう。加えて、湖の進化の貴重な情報を含んだ氷床の基層である約 100m アイスコアを採取することができる。

初めに、生態学的に純粋といえる湖とドリルの接触を確保する必要がある。

このためには、第2段階の作業に先立って、ボーリング孔の底部に生態学的にクリーンな掘削液（水や微生物の観点から無害である液体）を新たに導入することを計画している。その液体は、ボーリング孔の最上部ときれいな底部の厚さ約 100m に栓をするような働きをする。底部と以前使用していた掘削液（航空機燃料 TC-1 と Freon 141b の混合液）を分けるこの緩衝帯の密度は、掘削液よりも大きい湖よりも小さい。この航空機燃料は、構成比 20-22%の芳香族を含む、成分や構造が異なる炭化水素化合物の混合物である。また、Freon 141b は、1, 1, 1 フルオロジクロロエタン CH_3CFC_2 である。

第2段階の作業（湖に達するまでの約 30m の掘削）では、試験孔の直径が主孔（main hole）よりも 3-4 倍小さいことため、段階的に稼働するサーマルドリル（TBPO-132）を使用する予定である。掘削の間、ボーリング孔は氷荷重圧不足を維持する。

サーマルドリル（TBPO-132）は、刃（a pilot-chisel）とリングビット¹からできた、電気で熱して使用する機械である。ドリルには、ポンプとフィードバックシステムセンサーも装備されている。サーマルドリルは電気メカニカルドリルと似ており、ケーブルで吊るされている。湖に達する最後の 30m のボーリング速度は、最高 3m/時間である。湖面に接した瞬間、刃を支えていた氷がなくなり、接触センサーが反応する。ボーリング孔の底部を残りから分離する機械にスイッチが入る。同時に、センサーがボーリング孔と湖の圧力の差をチェックしている間、掘削は止まる。

ボーリング孔の底部が湖の表面に達した時、底部の掘削液カラム圧力 P_f と湖の水圧 P_1 の比は、

¹削孔している孔の先端部で氷と接しながら氷を削り取るための器具輪

1) $P_f < P_1$ 2) $P_f = P_1$ 3) $P_f > P_1$ の3つの場合が考えられる。これらのうち、可能性が最も高いのは1)であり、2)と3)は起こりにくいと考えられる。

$P_f < P_1$: 湖水は、圧力の差 $P_f - P_1$ に応じて、高さ h まで上昇する。サーマルドリルでは、装置がドリルの重さと等しい力で常に下面（氷）と接している。このため、湖からボーリング孔に直接湖水が入ってくることはない。ドリルを引き上げるか、ドリルが下面を押す力より湖水の圧力が大きい場合に、その圧力差により湖面に達した瞬間に生じる力によって湖水が上昇する（ドリルの重さはアルキメデスの原理による浮力で軽くなる）。

$P_f = P_1$: 湖水は、掘削液の圧力に伴いドリルの位置まで上昇する。つまり、ボーリング孔から引き抜いたケーブルの分だけ、湖水が上昇すると考えられる。

$P_f > P_1$: 最も起こりにくいと考えられるケースである。サーマルドリルが湖の表面に接する状態では、 P_0 は、ドリルが環状のボーリング孔の底に圧力がかかり始めた時の圧力である。電力の供給を止めた状態で、リングビットはボーリング孔の底の端に反発して圧力がかかり湖から離れる。

さらに、 $P_f < P_1$ が確保される値になるまで、ボーリング孔から掘削液を吸い上げて、その高さ（掘削液の位置）を低くすることが必要である。 $P_f < P_1$ の状態になったら、ボーリング孔からドリルを回収し始める。

このため、サーマルドリルはバルブのような機能を果たし、刃と湖の表面が接触する瞬間に、それを切り離して貫通しないようにして生態学的な安全性を確保する。

湖と接触するまでの最後の 30m を掘削するために、サーマルドリルを底部から離さずに使用する。ドリルによって溶解する氷については、ドリルとケーブルは自然と溶融水が掘削液を洗い落としてきれいにする。この溶融水は有機シリコン液（ポリジメチルシロキサン）の下にもう1つのバッファゾーンを作ることになる。湖の表面に達した後（つまり第2段階の最後）、ボーリング孔 5G-1 での作業は、ボーリング孔に入ってきた湖水が凍る間休止する。それから、凍った湖水の一部を深層用の電機メカニカルドリル KEMS-132 を用いてサンプリングする。サンプリングについては、設計者が考案後に何度も使用し、その実用性について証明された方法を用いて、このコアの内側を生物学的に清潔に保つため、あらゆる予防措置を遵守して実施する。残った氷は、5G-1 と湖の表面を完全な分離を確保するために掘削を行わない。圧力を平衡に保つために、掘削したボーリング孔は、航空機用燃料 TC-1 と Freon-141b を混合した不凍液（体積比は 5:1）で埋める。

ポリジメチルシロキサンは、生物学的には毒性が低く不活性な物質であり、湖水と接触し、仮に生物相が湖に存在したとしても、その生物相に影響を及ぼすことはないと考えられる。

明らかに、将来的に微生物や他の分野の研究に最も役立つ資料といえ、氷塊が大きくなっている下層部分である。ここは湖からボーリング孔に水が流入することによって南極地域外からの混合物が滞留することから、最も影響を受けない部分である。

プロジェクトの第7章では、「深層掘削工程における緊急事態についてのシナリオ」についてまとめており、予想外に湖にドリルが貫通した場合には、少量の掘削液と南極地域外の微生物相が湖に入り込む可能性について言及している。しかし、ボーリング孔への湖水の流入により、これらは湖水と一緒にボーリング孔へ戻されると考えられる。

残存湖であるポストーク湖が地上にできることによる考えられる現存生物への生態学的危険に対して、以下の点があげられる。

第一に、深層氷床として採取した湖水のサンプルは、優秀な研究者に委ねられ管理されるだろう。

第二に、計算データによると、ボーリング孔の底が氷でふたされることにより、湖水とボーリング孔が長い間接触することはない。

第三に、（特にこれが重要であるが）現在の共通認識では、恒温動物及び人類の出現とともに人

間の菌が出現したと考えられている。そして、人間の菌が現れる遙か以前から現在の文明と断絶されていた試料を扱うことになる。ポストーク湖の湖水により形成された氷層の微生物予備調査によると、腐生植物²を除いては珍しい微生物は見られなかった。この腐生植物は、微生物学者の間で昔から知られており水中でよく確認される。

現在、ポストーク湖へのアクセスのプロジェクトとして複数案がある。氷塊を貫通して湖水に達する際には、同時に研究ができること、加えて、汚染を最小限に抑えることが課題である。この技術的解決策の一例として、アメリカの自動装置を使った方法、いわゆるクライオボット&ハイドロボットについて、プロジェクト報告書で記載している。クライオボットは長さ約 2m、直径 10~20cm で、輸送及び通信機能を有した極細のケーブルで氷床上にある基地とのつなぐ計画である。クライオボットは、それ自身の重さで氷床の下へと進む。動きに伴い、クライオボット内のリールからケーブルが出て、ケーブルは凍ったまま装置のあとを氷に入ってしまったことになる。アメリカの技術者の設計によると、氷床を進む時は、ハイドロボットはクライオボットの中に収納されている。クライオボットが湖水に接触した際、ハイドロボットが離脱して湖水の単独調査を開始し、ケーブルを通じて結果をクライオボットに送る。一連の結果には、映像や化学的なデータ、非溶解性の浮遊物質、栄養元素の存在に関するデータなどが含まれるであろう。

このアメリカ案は、湖を調査する際、生態学的にかなり安全な状態が確保される点では注目に値する。しかし、実施にあたっては、湖水の表面に近づくためにできるだけ深い位置までクライオボットを運搬するために、新たな掘削作業が必要となる。また、クライオボットまでの長さ 400 m のケーブル付きリールを設置する必要があるが、これはかなり非現実的である。

AARI 及び SPSMI が提案しているポストーク湖貫通工法は、先述したアメリカの工法と比較して、ボーリング孔全体に渡る管理、掘削時の作業の自動化という、簡便性及び信頼性の面で優れている。

SEEE は、この章に関して次のように指摘している。プロジェクトの枠組み内で生態学的に安全な掘削作業を確保するための対策として、次の 2 点があり、注意深く検討する必要があること。

- ・ 異なる掘削液の使用、メカニカル/サーマル掘削工法の採用によって決まる技術面の要素
- ・ 掘削装置の設計上のパラメーターによって決まる土木面の要素

技術面での対策

湖に到達する前に、掘削液の緩衝層を設ける必要がある。こうすることで、湖の汚染リスクを軽減することができる。主な技術面での対策としては、掘削液が湖に浸透しないように、掘削液による圧力が湖水による圧力よりも小さくなるような層をボーリング孔の底部に設けることである。これは、ボーリング孔内の掘削液による圧力を十分に正確に測定することで可能である。プロジェクト報告書の作成者が行った見積りによると、現在の圧力測定の精度は、0.9b を下回ってはいない。作業が生態学的に安全であることを確保するには、この精度を上げることが最も重要である。分析能力の高い装置を用いてボーリング孔の底部における圧力を計算したところ、その精度は比較的低かった。これはボーリング孔の深さと掘削液の高さの測定精度が低いことによると考えられる。プロジェクト報告書には、メカニカル掘削の終了の仕方やサーマル掘削の進め方、湖の表面までの氷層の厚さ、そしてその精度についてどのように決めるのかについて記述していない。

土木面での対策

第二段階で使用するサーマルドリルの設計パラメータには、ドリルが湖に出てしまうことや掘

² 腐生植物：生物遺体または分解した有機物を利用して生活する植物

削液がボーリング孔から湖へ浸透することは含んでいない。SEEE の意見によると、提案されている工法を用いて湖に到達する場合、湖水の汚染経路として次の2つが考えられる。

- ・湖水とドリルの表面が接触した時に域外物質が流入すること…… (1)
- ・域外物質がボーリング孔から拡散し、氷層を通じて湖に流入すること…………… (2)

2つの経過について個別に考えることにする。

(1) の経路

最終的に掘削段階に入る前に、サーマルドリルがボーリング孔に下ろされるとすると、ドリルは掘削液の層を通るため、結果的にその表面は掘削液の薄い膜で覆われる。提出された資料には、どのタイミングでシリコン・オイルがボーリング孔へ導入されるのか、つまり、ドリルが浸水する前か後かについて示されていない。

もし、ドリルが燃料と充填剤の層を通してのみボーリング孔に入るなら、燃料とフルオロクロロメタンから成る炭化水素化合物はドリルの表面に吸着される。ドリルの稼動部分に熱が加わると、吸着した物質は部分的に離脱し、融水へ流出し、そして氷に流出する。残りの吸着物質は、ドリルの表面から湖水に入る可能性がある。

燃料でできた層のあとに、もしドリルが 100m の PMS を通過する場合には、ポリオルガノシロキサンに溶ける燃料は洗い落とされ、ポリジメチルシロキサンで覆われる。この場合、底部ではポリジメチルシロキサン分子がドリルの刃の表面に付着し、これが湖水と接触することはあり得る。しかし、表面がポリジメチルシロキサンで覆われて湿った角 (edge angle) は 90° であり、その疎水性からすると、この物質は水に溶解しない。水中では非常に少量で、表面で水滴になるか、膜を形成する傾向にある。膜が形成されないと思われるが、仮にそのような状況が生じたとしても、その大部分はボーリング孔の中へ入ると考えられる。水中にポリジメチルシロキサンが残るかもしれないが、かなり少量であり、mg あるいはそれ以下のレベルであると考えられる。また、ポリジメチルシロキサンは毒性のない物質であり、生物に対しては無害であると知られている点も考慮しておく必要がある。さらに、ポリジメチルシロキサンは水と反応せず、自然界起源の塩類に溶解することもない。分解するには、水中でアルカリと反応させるか、大気中で 2500°C 以上で熱する必要がある。分解によって、前者はケイ酸塩アニオンとメタノール、後者はシリカ (無水ケイ酸)、炭酸ガス、水が生成する。

専門家による精査のために提出された資料からは、ドリルがどのようにしてボーリング孔を閉じるのか、そしてボーリング孔の壁面とドリルの間で掘削液が漏れたりするのかについてわからない。仮に湖にポリジメチルシロキサンが漏出しても、芳香化合物やその他の有害物質を含む燃料 (灯油) と比較すると、影響は小さい。

(2) の経路

石油及び石油製品は氷内に広がった場合、よく吸収されることが知られている。ビューフォート海でのカナダアメリカ隊が行った氷塊内における石油の移動速度は、40mm/日であった (1974 年)。AARI がラドガ湖 (Lake Ladoga) で行った実験では、50mm/日であった (1978 年)。North Pole-22 基地において、北極の氷内における石油及び石油製品の垂直及び水平方向の挙動について、の構造や組成、石油や石油製品の密度、太陽照射温度やその強度を変化させて調べた。その結果、夏季に 80mm/日に増加し、冬季に 20mm/日に減少した。多年氷 (multiyear ice) による調査では、多くの間隙に染み込んだため 490mm/日となった。

南極においてもボーリング孔の壁面に掘削液が接した場合には同様な移動が生じると考えられる。南極特有の条件は、この浸透プロセスにも影響するが、ケロシンからなる炭化水素も氷へ移動すると考えられる。

仮に炭化水素化合物の拡散速度を、北極で得られた最も遅い速度の半分である 10mm/日とし、ボーリング孔 5G-1 をケロシンで満たし保存して 2 年以上経過したとすると、石油製品は、ボーリ

ング孔のあらゆる方向へ（下層への移動もある）7-8m以上移動する。ここで、南極の低温を考慮すると、表層へ移動した炭化水素化合物の蒸発は少ない。そして、数十年もしくは数世紀にわたる氷塊自身の自浄作用が生じるであろう。しかし、既存のボーリング孔からのケロシンによる南極氷汚染はすでに生じており、これは本当のことである。

ポリジメチルシロキサン油に関する氷内の挙動は、今まで研究されていない。しかし、ケロシン内の炭化水素分子に比べ、有機シリコンオリゴマーの分子はかなり大きく、移動しにくいと考えられる。しかし、有機シロキサン類が炭化水素類によく溶けることから、充填剤であるケロシンと有機シロキサンの2層だったものが、結局、お互いに解け合い1層になるため、複雑である。もし、湖と掘削液の間にある氷がボーリング孔内で長期間にわたって、そのままの状態であった場合は、ボーリング孔の氷面を浸透した炭化水素類やポリジメチルシロキサンにより湖が汚染される恐れがある。

本計画では、約30m高さを掘削する過程で形成される溶融水の熱収支の変化について予測していない。ドリルが湖面との境界に達するまでに、氷点下でボーリング孔の氷壁に付着した溶融水や上部に結晶化した水を取り除くことはできない。もし、取り除こうとした場合、この研究はとても複雑なものになる。

サーマルドリル実施の際、溶融水がドリルとケーブルの掘削液を同時に洗い落としてきれいにする。この溶融水は有機シリコン液の下層にもう1つのバッファゾーンを作ることになる。

サーマルドリルは、湖への浸透に関して生態的安全性を確保するバルブのような機能を果たすと考えられる。湖面に達した場合、掘削作業を停止後、ボーリング孔内で湖水が完全に凍結し、湖水がボーリング孔に混入される状態を作り出すよう計画されている。その後、電気メカニカルドリル KEMS-132 を用いて湖水のサンプリングを実施する。湖面との境界にある氷の一部は、ボーリング孔と湖水との接触を防ぐとともに、考えられる悪影響を防ぐため掘削を行わない。本事項はこの研究ではとても重要な段階で、これを維持しなければならない。

Freon141b の使用に関して、本プロジェクトは「オゾン層に実質的な影響は生じない物質である」としているが、これは正しくない。Freon141b はハイドロクロロフルオロカーボン的一种である (CH_3CFCl_2)。ウィーン条約 (1985 年) 及びモントリオール議定書 (1987 年) における本物質の名前は HCFC-141b で、オゾン破壊係数 0.11 (CFC-11 の破壊係数を 1.0 とした相対値) HCFC-141b は、その消費量を 2004 年 1 月 1 日までに 35%、2010 年 1 月 1 日までに 65%、2030 年 1 月 1 日に全廃しなければならない。

しかし、オゾン層破壊物質に関する最近の国際会議で、HCFC 類の使用を控える十分な取り組みが必要であるとの主張がますます頻繁に聞かれるようになってきた。提出されたプロジェクト報告書の枠組みの中では、クローズドシステムが検討されていることから、大気中に放出する Freon-141 の量は極めて少ないと考えられる。

サーマルドリルが栓のような役目を果たしてボーリング孔を密閉することについては、十分に容認されるものではない。

水が凍らない（溶融水-緩衝体としての役目）と考えるに十分な根拠となるヒートシンク速度 (heat sink rate) や掘削能力について計算した結果はない

プロジェクト報告書では、掘削液、その構成物質、運搬・保管方法、その特性にかなり注目してまとめている。残念なことに、殺菌剤、これらの液体の細菌発育抑制に関する特性、それらの液体に微生物の細胞が存在する可能性などに関するデータはない。ボーリング孔 5G-1 から採取した氷床コアのサンプルを長年にわたり研究してきた成果から、燃料（浸透能力は高い）も微生物の細胞（おそらく掘削液にわずかに含まれる）も氷床コアの中心まで浸透することはない。従って、ボーリング孔の中に掘削液が存在しても、実験で示されたように氷床コアの微生物調査の結果に何ら影響を及ぼすものではなかった。しかし、湖に掘削液が浸透すると、その中にある微生物

物の細胞が湖へ入り込むことになる。SEEE は、図書の内容について検討しコメントをしている。コメントは、提案されている工法が生態学的に安全であることに直接関係するものではなく、全て化学的な用語や公式の不適切な使い方についてである。

湖の汚染を防ぐためには手法の信頼性や効率性を上げることが重要であり、それにあたって専門家委員会は以下のような提案を行っている。

4. 勧告及び提案事項

プロジェクトが生態学的に安全であることを確保するために、ポストーク湖貫通プロジェクトに取りかかる前に、開発した工法や掘削装置について、失敗しないようにフィールドの条件下で事前確認をしておくことが望ましい。専門家委員会は、深層のボーリング孔の掘削実施前に、ドリルデザイン及びフィールド実験を実施し、詳細に検討しておくことを提案している。

1. ドリルを用いたパラメータ、プロセス、デザインの各特性を把握するための事前調査の実施が望ましい。
2. 最後の 30m の掘削についても同じことが言えよう。ドリルに付いたケーブルは緩衝液の一部を伴って下層へ移動する。従って、作業者はドリルが湖に貫通しそうだと感知した時に、表面に緩衝となる粒子が生成される間 (buffer particles time)、掘削を止める必要があると考えられる。最後の 30m については、更なる検討が必要である。
3. 詳細な文書作成に、専門家委員会は次のようなことが必要であると考えている。
 - ・ ボーリング孔の中の掘削液による圧力と氷塊の圧力の差について調べ精度を高めること。
 - ・ サーマルドリルでの掘削に移行するタイミングを特定する方法を確立すること。
 - ・ ボーリング孔の底と氷の表面にある氷層の厚さを特定する方法を確立すること。
 - ・ 深層掘削作業を実施するまえに、ドリルの詳細設計及び慎重にフィールド実験を実施すること。
 - ・ 作業中に湖水から溶融水を分離する方法の確立、及びヒートシンク速度 (heat sink rate)、サーマルドリルの能力を特定すること。
 - ・ ボーリング孔の壁面とドリル本体の間にある掘削液やポリジメチルシロキサン油の漏洩について実験で確認しておくこと。また、漏洩が生じる場合には、ドリルの設計の改良または他の方法により、それを除去すること。
 - ・ 氷内での炭化水素の拡散について検討し、それをもとに、ボーリング孔にふたする時の安全な氷厚及びボーリング孔に滞留する燃料の最大許容時間について計算すること。
 - ・ 燃料及びポリジメチルシロキサン油の分解を防止・抑制する方法を開発・検証し、湖に近づくにあたっては最適な方法を選択すること。
 - ・ 湖水との境界において氷層の固有の特性 (monolithic character) を壊す可能性について検討すること。
4. 専門家委員会の意見によると、掘削液を扱う全工程において、可能であれば掘削液の純度を保つことが必要であると指摘している。また、プロジェクトでは、「ボーリング孔からケーブルやドリルを回収する時に流出する液体が、再びボーリング孔に入って行かないように受け皿に集める」ことになっている。この過程では、再びボーリング孔に入って行く流出液と接触する受け皿やその他の機材が非常に清潔な状態であることを監視する必要がある。
5. 特に湖や大気に深刻な環境影響を伴う緊急事態が生じるようなあらゆるケースを分析し、詳細に文書にとりまとめ提出すべきである。
6. バッファゾーンの汚染を予知し取り除く必要がある。100m 充填するには、ドリルを 10 回降ろしたり回収したりする必要があり、その都度、バッファゾーンに掘削液が浸透する可能性がある。このことから、このメカニズムについてさらに注意して調査する必要がある。理論的

には、(例えば、「boot effect」手法を用いて) 実験室やフィールドで調査できるであろう。
7. 研究中には、殺菌剤や掘削液の細菌学から見た特性について検討すべきである。

5. プロジェクト実施期間中の環境保全について

まず、湖の汚染を防止するという観点から、貫通に係る技術的解決策について評価を行った。

数学モデルや物理モデルを使ったリモートセンシング地球物理調査に加え、ボストーク湖の調査計画(湖の起源、水理化学、水生生物の存在の可能性や条件)が予定されている。また、湖の水に直接貫通し、研究する予定である。なお、湖へのアクセス時間は短くする。

湖にアクセスする際には、装置や作業上の清潔さを維持することが絶対条件であり、これにより化学的・生物的汚染から貴重な対象物を保護しなければならない。

環境影響をいかに最小にするかが、この氷河湖調査を目的とした掘削作業の大きな課題である。この影響は直接影響と間接影響に分けられる。

直接影響については、ボーリング孔周辺における廃棄物の堆積、すなわち混合掘削液の使用、ボーリング孔を掘り下げること、ボーリング孔における氷の構造の変化、すなわち貫通しボーリング孔に入った 1.5m³の水が湖を汚染しないように湖に達することなどである。間接影響については、掘削液の湖への浸透や湖内での掘削装置の紛失などといった予想外の環境影響リスクなどが含まれる。

SEEE は、考えられる環境影響に関して前述のようにあらゆる視点から詳細に検討したと述べている。前述した種々のインパクトは、ボストーク基地周辺に様々な環境影響が生じることは明らかであろう。特にボーリング孔 5G-1 をさらに 130m 掘り下げた時の氷構造の変化が懸念される。特殊な組成である航空燃料 TC-1、Freon141-b、有機シリコン液といった掘削液のボーリング孔内の存在、氷床の表面における研究と湖の解明。4人チームによる 5G-1 のボーリングの継続は、深刻な環境変化を生じることはないと考えられる。また、環境影響の規模を評価したところ、事業者が、この影響について回避や代替措置を講じることから、影響はかなり限定的であり大きな環境変化にはつながらないと考えている。

AARI が提出した資料には、5G-1 ボーリング及びボストーク湖貫通の際の環境影響について論じ評価しており、その影響を最小限にするための措置についてもまとめている。

プロジェクトの予測の結果、大気質や湖の性質に深刻な変化が生じることはないと考えられる。

SEEE の見解では、「ボーリング孔 5G-1 掘削及びボストーク湖貫通に係る環境影響評価」の章で、国際協定で記述されているように、ボストーク基地における特殊な自然環境を保全するための必要事項全てについて検討している。

しかしながら、SEEE は、このような貴重な資源をより効率的に保全するために、次のような点について提言している。

5.1 勧告及び提案

1. 計画地付近における環境保全の観点から重要な提案事項として、ボストーク湖へ近づく際には、信頼性が高く生態学的にクリーンかつ試験済みの手法を使用することを第一に考えること。
2. SEEE の見解では、南極環境保護条約第 8 条の EIA の章に照らして、これに従って貫通や掘削といった将来の活動による影響を次の定義に従い定義づけこととしている。
 - a) 軽微あるいは一時的な影響を下回る
 - b) 軽微あるいは一時的な影響と同等
 - c) 軽微あるいは一時的な影響を上回る

マドリード条約によると、基準 b) と c) の規定では、第 3 条(条約の付属書 I)に従って、全て

のサブパラグラフについての詳細な回答を用意し、CEE（包括的環境影響評価）を行うことを要求している。

プロジェクトでは、そのような資料（回答）を用意している。カテゴリ(b)または(c)に照らして評価されたかどうかについて正確に記述する必要がある。

3. 詳細設計段階では、包括的な生態系モニタリングプログラムの作成を行うこと。

6. 提出資料の総合評価

1. SEEE は、提出された資料を検討した結果、本プロジェクトについては総じて前向きに評価している。

本プロジェクトでは、ボストーク湖の水を外部からの汚染から保護するため、十分に効果的な措置を採用している点に特徴がある。また、その中では、生態学的な視点からの危険因子について相当程度特定しており、また、ボーリングの各段階においてボストーク湖や氷塊を汚染するリスクについても分析を行っている。

プロジェクトは、非常に高い技術を用いて実施するものであり、科学的にも評価に値することは明らかである。プロジェクトの実施は必要である。

2. すでに深度 3523m に達しているボーリング孔 5G-1 をさらに掘り下げる案では、基地で利用できる装置を用いて実験済かつ効率的な方法を採用することとしており、作業上のリスクを最小限にするとともに十分に信頼性の高いものである。さらに、研究の際には、ミティゲーション手法を組み合わせる実施するとしている。

3. 提案されている事業に関する土木工学的なパラメータについては、さらに慎重に検討を要する事柄もあるものの、詳細に分析されたものである。これは、要は管理と包括的な環境モニタリングの問題である。

4. 考えられる環境影響は、行政文書で書かれた原則やロシア国内法、国連のプログラム文書（1992 年の第 2 回国連会議）、南極環境保護条約（1991 年 10 月 4 日マドリードで調印）に相反するものではない。

5. 検討中の研究には、多くの興味深い証拠、オリジナルの技術的解決策が含まれており、科学及び技術という点で、総じて証明できるであろう。ボストーク湖を汚染しないための簡潔で十分に効率的な方法により行う

6. 圧力の違いから生じる掘削液の湖への浸透を防ぐために事業者が行った計算は、かなり確度の高いものと考えられる。また、ボーリング孔内の掘削液の圧力は、湖の水圧よりも小さいだろう。つまり、ボーリング孔が湖に達する瞬間に、湖水がボーリング孔に向かって上昇すると考えられる。計算によると、これは掘削液の圧力を変えることで制御できる。

7. プロジェクトでは、工法や装置を用いて様々な環境保全についてきちんと検討されている。掘削及び湖への貫通の工程で使用される掘削液の物理化学的な特性についても詳細に検討している。最後の 130m において緩衝剤として疎水性／不活性の性質を持つ有機シリコンの掘削液（シリコン油の一種）を選んだ点も十分に適当であろう。

掘削液が疎水性であり、かつ水よりも軽いことから、相当な量の掘削液の湖への浸透は、排除されるだろう。また、SEEE はポリジメチルシロキサンが居所的に混入し存在したとしても、化学的あるいは生物学的な観点から湖に大きな影響をもたらすことはないと考えている。

ボーリング作業中も作業完了後も、ポリジメチルシロキサンは分解しないと考えられる。

8. プロジェクトでは、ボストーク基地における長年の氷河掘削の経験から、非常に重要かつ難しい問題を解決する方法が提案されている。その方法は、十分に信頼でき、巧妙なもので、かつ効果的・独創的なものである。本プロジェクトは、シンプル、比較的安価、信頼性、現

実性の点で、諸外国のものより優れている。

「両極の大洋及び海洋における総合研究」と「氷河下にあるポストーク湖貫通に係る生態学的にクリーンな方法の開発とその是非」のプログラムの下で AARI 及び SPSMI が開発したプロジェクトは、諸外国のものと比較して最も容認できるものである。また、生態学的に安全という視点で見ると、要求事項を満たしており評価できる。

9. ポストーク湖貫通作業の間に用いる生態学的にクリーンな方法の開発、そして環境影響評価に関して提出された資料は、専門性の高いものであり、SEEE の勧告及び提案を考慮しつつ承認され得るものである。

「結論」

1. 本プロジェクトは、基本的に、その内容や規模から見て、連邦法の遵守とドキュメントの作成を行い進めることになる。また、本プロジェクトは、この中で自然環境の保全対策及び生態学的見地から許される活動計画の是非を示した環境影響評価書が含まれている。
2. プロジェクトの実施に使用される化学物質に関する許可証やプロジェクト関連資料の精査した結果、SEEE は、ポストーク湖氷河貫通作業の工程に伴う影響は許容範囲内であり、詳細な図書を作成するための基礎情報として利用でき得るものであると考える。
3. 詳細設計やプロジェクト実施段階では、「結論」で示した提案事項を考慮する必要がある。