

先端計測技術の融合で実現する
高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発
(委託研究)

—平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Research and Development of Radiation-resistant Sensor for Fuel Debris
by Integrating Advanced Measurement Technologies
(Contract Research)

-FY2018 Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology
and Human Resource Development-

廃炉国際共同研究センター
高エネルギー加速器研究機構

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science
High Energy Accelerator Research Organization

福島研究開発部門
福島研究開発拠点

Fukushima Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development

March 2020

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発（委託研究）

－ 平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 －

日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点

廃炉国際共同研究センター

高エネルギー加速器研究機構

(2019 年 11 月 29 日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉国際共同研究センター（CLADS）では、平成 30 年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という）を実施している。本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等を始めとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、平成 30 年度「先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発」について取りまとめたものである。

本研究は、冠水した燃料デブリの分布状況及び臨界性を「その場」で測定・分析することを目的として、小型（ $200\mu\text{m}\times 5\sim 10\mu\text{m}$ 厚）のダイヤモンド中性子センサーと、回路設計により耐放射線性を向上した集積回路を開発して中性子計測システムを構築し、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置（SBP）とともに、ROV（日英共研で開発）に設置し、PCV 模擬水槽で実証試験を行う。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の委託業務として、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が実施した成果に関するものである。

廃炉国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Research and Development of Radiation-resistant Sensor for Fuel Debris by Integrating Advanced
Measurement Technologies (Contract Research)
—FY2018 Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource
Development—

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science

High Energy Accelerator Research Organization

Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

(Received November 29, 2019)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development (hereafter referred to “the Project”) in FY2018. The Project aims to contribute to solving problems in nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields. The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2018, this report summarizes the research results of the “Research and Development of Radiation-resistant Sensor for Fuel Debris by Integrating Advanced Measurement Technologies”.

The present study aims to in-situ measure and analyze the distribution status and criticality of flooded fuel debris. For this purpose, we construct a neutron measurement system by developing compact diamond neutron sensor (200 $\mu\text{m} \times 5 \sim 10 \mu\text{m}$ thickness) and integrated circuit whose radiation resistance was improved by circuit design. Along with the multi-phased array sonar and the acoustic sub-bottom profiling (SBP) system, the neutron measurement system will be installed in the ROV (developed by Japan-UK collaboration) and its demonstration tests will be conducted in a PCV mock-up water tank.

Keywords: Fuel Debris, CVD Diamond Detector, Radiation-resistant Integrated Circuit, Neutron Detection, Remotely Operated Vehicle, Sonar, Virtual Reality Technology

This work was performed by High Energy Accelerator Research Organization under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2 平成 30 年度採択課題	2
付録 成果報告書	5

Contents

1. Outline of Center of World Intelligence Project for Nuclear Science/Technology and Human Resource Development	1
2. Accepted Proposal in FY2018	2
Appendix Result Report	5

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究センター(以下、「CLADS」という。)を組織し、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。)に係る研究開発を進めている。

また、平成29年4月にCLADSの中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後はCLADSを中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム(平成31年度より新設)に再編した。

2. 平成 30 年度採択課題

平成 30 年度は「共通基盤型原子力研究プログラム」、「課題解決型廃炉研究プログラム」、「国際協力型廃炉研究プログラム」において、研究課題の採択を決定した。公募の概要は以下のとおりである。

- ・ 公募期間：平成 30 年 5 月 22 日（火）～6 月 22 日（金）
平成 30 年 5 月 22 日（火）～7 月 12 日（木）※日英共同研究のみ
- ・ 提案数：
共通基盤型原子力研究プログラム 49 課題（若手研究 14 課題、一般研究 35 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム 28 課題
国際協力型廃炉研究プログラム 5 課題

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定し、その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、表 2-1 に掲げる 19 の採択課題を決定した。

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧（1/3）

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧 (2/3)

課題名	研究代表者	所属機関
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学

表 2-1 平成 30 年度採択課題一覧 (3/3)

課題名	研究代表者	所属機関
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム (日英共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

国際協力型廃炉研究プログラム (日仏共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
採択なし	—	—

本報告書は上記のうち、課題解決型廃炉研究プログラム「先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発」について記したものである。

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録
成果報告書

This is a blank page.

平成 30 年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

先端計測技術の融合で実現する
高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発
(契約番号 30I123)

成果報告書

平成 31 年 3 月

大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力技術・人材育成推進事業」による委託業務として、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が実施した平成 30 年度「先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	
1.1 研究の狙い	1.1
1.2 背景	1.1
1.3 研究構想	1.2
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1
2.2 平成30年度の成果の目標及び業務の実施方法	2.2
3. 平成30年度の実施内容及び成果	
3.1 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発	3.1-1
3.1.1 耐放射線トランジスタおよび集積回路の研究開発	3.1-1
(1) 耐放射線トランジスタの開発研究	
(2) 中性子検出素子用信号処理集積回路の開発研究	
3.1.2 核分裂中性子測定システムの開発	3.1-7
(1) 計算環境の整備	
(2) 中性子感度に対する試解析	
(3) γ 線影響評価	
(4) パイルアップ評価	
3.2 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発（再委託先：物質・材料研究機構）	3.2-1
3.2.1 高品質ダイヤモンド成長に関する研究	3.2-1
(1) {111}単結晶基板表面でのCVDダイヤモンドの成長	
(2) 共焦点ラマン分光による{111}単結晶基板表面でのCVDダイヤモンドの結晶品質評価	
(3) 原子間力顕微鏡(AFM)による原子ステップ観察	
3.2.2 センサー形成プロセスに関する研究	3.2-9
(1) 試料作製	
(2) エッチングレート評価法	
(3) 電気特性評価	
3.2.3 中性子検出用センサー構造に関する研究	3.2-14
(1) 中性子コンバータ膜の選定	
(2) モンテカルロシミュレーションによる中性子コンバータ、センサー有感層厚さの見積もり	
3.3 複合型センサーを搭載した水中ロボットによる遠隔計測技術の開発 （再委託先：海上技術安全研究所）	3.3-1

3.3.1 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発	3.3-1
(1) SBP を用いた堆積物識別	
(2) 音響探査システム構成デバイスの小型化検討	
3.3.2 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発	3.3-9
(1) ROV の改良検討	
(2) PCV 模擬環境利用試験方法の検討	
3.4 研究推進	3.4-1
4. 結言	4.1

表一覧

表 3. 1. 2-1	${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応と ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応の熱中性子吸収断面積と発熱エネルギー (Q 値)	3. 1-9
表 3. 1. 2-2	Cividec 社製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の構造パラメータ	3. 1-10
表 3. 1. 2-3	真の計数率を 10^6 cps、信号の時間幅を 10 ns とした場合のパイルアップ割合 (N_n/N_1)	3. 1-18
表 3. 2. 1-1	ダイヤモンドのエピタキシャル成長条件	3. 2-2
表 3. 2. 2-1	エッチング条件	3. 2-9
表 3. 2. 2-2	マスク材とダイヤモンドのエッチングレート	3. 2-10
表 3. 3. 1-1	得られた反射率、透過率、砂礫層の音響インピーダンス	3. 3-4
表 3. 3. 1-2	従来製品と小型化スピーカの比較	3. 3-6
表 3. 3. 1-3	ソナー仕様比較	3. 3-7
表 3. 3. 1-4	特性試験に使用した装置類	3. 3-8
表 3. 3. 2-1	P-ROV 基本仕様	3. 3-9
表 3. 3. 2-2	P-ROV 搭載電力機器類	3. 3-10
表 3. 3. 2-3	改良比較表	3. 3-10
表 3. 3. 2-4	センサー通信用信号処理系	3. 3-13
表 3. 3. 2-5	遠隔操作方法とプラットフォームでの環境	3. 3-16

図一覧

図 2. 1-1	本業務の全体計画図	2. 1
図 3. 1. 1-1	トランジスタ評価装置の写真と NMOS 測定時のセットアップ例	3. 1-1
図 3. 1. 1-2	トランジスタ評価ボード (プリント基板、評価用トランジスタチップ、チップ収納用ソケットおよびコネクタ類) の写真とガンマ線照射時のセットアップ	3. 1-2
図 3. 1. 1-3	商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いたトランジスタ (W/L = 2 μm /480 nm) の放射線の影響	3. 1-3
図 3. 1. 1-4	商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いたトランジスタの総積分放射線量に対する閾値電圧変化を測定した結果	3. 1-4
図 3. 1. 1-5	商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いたトランジスタ評価用チップ	3. 1-5
図 3. 1. 1-6	商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いて開発した種々の回路要素	3. 1-6
図 3. 1. 2-1	炭素に対する電子と α 粒子の阻止能	3. 1-8
図 3. 1. 2-2	炭素 (密度 3.5 g/cm ³) に対する ${}^3\text{H}$ と α 粒子の飛程	3. 1-9
図 3. 1. 2-3	Cividec 社製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の外観図	3. 1-10
図 3. 1. 2-4	熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の内部構造	3. 1-10
図 3. 1. 2-5	PHITS 描画機能による体系モデルの確認結果	3. 1-11
図 3. 1. 2-6	PHITS による試解析結果の例 (${}^6\text{LiF}$ 部で生成粒子のエネルギー分布)	3. 1-12

図 3.1.2-7	PHITS による試解析結果の例 (${}^6\text{LiF}$ 部で生成する ${}^3\text{H}$ (左図) と α 粒子 (右図) のフラックス分布)	3.1-12
図 3.1.2-8	PHITS による試解析結果の例 (ダイヤモンド検出器部でのエネルギー付与分布)	3.1-13
図 3.1.2-9	Cividec 社が提供する熱中性子測定用ダイヤモンド検出器の波高スペクトルの例 [3.1.2-6]	3.1-13
図 3.1.2-10	ダイヤモンド検出器の ${}^{137}\text{Cs}$ からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $200 \times 200 \times 1 \mu\text{m}$ 厚、右図は $200 \times 200 \times 5 \mu\text{m}$ 厚	3.1-14
図 3.1.2-11	ダイヤモンド検出器の ${}^{137}\text{Cs}$ からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $200 \times 200 \times 10 \mu\text{m}$ 厚、右図は $200 \times 200 \times 25 \mu\text{m}$ 厚	3.1-15
図 3.1.2-12	ダイヤモンド検出器の ${}^{137}\text{Cs}$ からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $200 \times 200 \times 140 \mu\text{m}$ 厚、右図は $200 \times 200 \times 500 \mu\text{m}$ 厚	3.1-15
図 3.1.2-13	ダイヤモンド検出器の ${}^{137}\text{Cs}$ からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \mu\text{m}$ 厚、右図は $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m}$ 厚	3.1-16
図 3.1.2-14	ダイヤモンド検出器の ${}^{137}\text{Cs}$ からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 10 \mu\text{m}$ 厚、右図は $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 25 \mu\text{m}$ 厚	3.1-16
図 3.1.2-15	ダイヤモンド検出器の ${}^{137}\text{Cs}$ からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 140 \mu\text{m}$ 厚、右図は $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 500 \mu\text{m}$ 厚	3.1-17
図 3.2.1-1	プラズマ CVD システムの概略図	3.2-1
図 3.2.1-2	共焦点ラマン分光評価でのマッピング測定領域の概略	3.2-2
図 3.2.1-3	ホモエピタキシャル層の典型的なラマンスペクトル	3.2-3
図 3.2.1-4	ホモエピタキシャル層及び基板のラマンスペクトル	3.2-4
図 3.2.1-5	試料中心部の断面ラマンマッピング像	3.2-5
図 3.2.1-6	ラマンマッピング像から抽出したダイヤモンドピーク半値幅のヒストグラム	3.2-6
図 3.2.1-7	ダイヤモンド試料の AFM 像	3.2-7, 3.2-8
図 3.2.2-1	メサ構造形成プロセス	3.2-9
図 3.2.2-2	Al マスクを蒸着したダイヤモンド試料	3.2-10
図 3.2.2-3	エッチング速度評価プロセスと深さプロファイル	3.2-11
図 3.2.2-4	電気特性評価用超高真空プローバ	3.2-12
図 3.2.2-5	pin ダイオードの I - V 特性	3.2-13
図 3.2.3-1	放出核による hBN に対するエネルギー付与の深さ方向依存性	3.2-15
図 3.2.3-2	放出核によるダイヤモンドに対するエネルギー付与の深さ方向依存性	3.2-15
図 3.3.1-1	SBP を用いた海底探査状況の例	3.3-1
図 3.3.1-2	底質探査例	3.3-1
図 3.3.1-3	SBP システム構成	3.3-1
図 3.3.1-4	ハイドロフォンに入射する過程	3.3-2
図 3.3.1-5	ハイドロフォンの出力波形	3.3-2
図 3.3.1-6	試験水槽形状と測定系	3.3-3

図 3.3.1-7	小型水槽中の砂利とスピーカ	3.3-3
図 3.3.1-8	供試体	3.3-3
図 3.3.1-9	断層図 (砂利)	3.3-4
図 3.3.1-10	断層図 (コンクリートレンガ)	3.3-4
図 3.3.1-11	断層図 (ステンレスブロック)	3.3-4
図 3.3.1-12	従来水中スピーカと小型化水中スピーカの外觀	3.3-6
図 3.3.1-13	現有ソナー DT-100	3.3-7
図 3.3.1-14	Garmin 社製ソナー PS-31	3.3-7
図 3.3.1-15	スピーカ試験用水槽	3.3-7
図 3.3.1-16	特性試験に使用した装置と水槽での配置概要	3.3-8
図 3.3.1-17	受信した音波スペクトル(100 Hz)	3.3-8
図 3.3.1-18	受信した音波スペクトル(1000 Hz)	3.3-9
図 3.3.1-19	受信した音波スペクトル(20000 Hz)	3.3-9
図 3.3.2-1	P-ROV の外形図	3.3-9
図 3.3.2-2	改良後の P-ROV	3.3-9
図 3.3.2-3	改良前後における ROV の性能比較	3.3-10
図 3.3.2-4	電力通信系のブロック図	3.3-12
図 3.3.2-5	ROV 内部配線	3.3-12
図 3.3.2-6	試験体系の概要 水槽中の供試体設置位置	3.3-14
図 3.3.2-7	供試体設置用治具	3.3-14
図 3.3.2-8	供試体載せ台	3.3-14
図 3.3.2-9	ソナーデータを点群データに変換する手順	3.3-17
図 3.3.2-10	ソナーデータを点群データに変換して 3 次元画像に変換した結果	3.3-17

略語一覧

CVD	: Chemical Vapor Deposition	(化学気相成長)
ROV	: Remotely Operated Vehicle	(水中ロボット)
SBP	: Sub Bottom Profiler	(表層下部探査装置)

This is a blank page.

概略

東京電力福島第一原子力発電所(以下 1F)の廃炉を加速するためには、先ずは燃料デブリの位置を把握して、通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因するリスクを、継続的、かつ速やかに下げつつ、廃炉工法を決定する必要がある。更に燃料デブリの取り出し時の、作業員の安全を確保するためには、廃炉工法の各工程における燃料デブリの臨界性をなるべく正確に評価し、迅速に対策を施すことが必要となる。そこで、本業務では冠水した燃料デブリの分布状況及び臨界性を「その場」で測定・分析することを目的として、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置(SBP)とダイヤモンド中性子センサーからなる複合計測技術の開発を分野横断的な研究体制によって行う。ソナーやSBPによる水底形状や水底表層下部構造の情報から燃料デブリの存在が疑われる場所を選定し、燃料デブリの自発核分裂によって放出される中性子をテレスコープ状コリメータによって中性子検出用ダイヤモンドセンサーに導き、燃料デブリの位置を特定するシステムを開発する。更に水中の減弱距離から推定される中性子のエネルギー分布から、燃料デブリと共存している物質に関する情報を引き出す。高信号対雑音比、高計数率を実現する信号処理集積回路については、超微細 CMOS プロセスを用いた高耐放射線トランジスタデザインを通じて耐放射線化を図る。また、これらを搭載して所定の位置に配置させるための遠隔操作技術の開発・試験を、原子炉格納容器を模擬したロボット試験用水槽等を用いて実施する。

本申請は物質・材料研究機構(NIMS)で行う 1. 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発および高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行う 2. 高耐放射線 ASIC(信号処理集積回路)の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発、および海上・港湾・航空技術研究所/海上技術安全研究所(NMRI)で行う 3. 複合型センサー及び水中ロボットによる遠隔計測技術の開発の 3 つの柱からなる。

1. 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発は以下の 3 項目よりなる。

①高品質ダイヤモンド成長に関する研究

現在 NIMS では量子コンピュータ用の超高品質結晶を開発しており、そのノウハウを本研究に生かす事でより効果的に高性能ダイヤモンドセンサーを開発するための結晶を製作する。初年度の準備期間を経て、2 年目に高品質結晶を製作し、3 年目には②と③で最適化されたプロセスと検出器構造を高品質結晶上に実現する。

②センサー開発プロセスに関する研究

ダイヤモンドセンサーを製作するには、p 型、n 型の半導体薄膜成長プロセスと電極製作の研究が必須である。高品質ダイヤモンド膜の研究は 2 年目から始めるため、初年度はダイヤモンド結晶を購入し、それに対してドーピング濃度、プロファイル、構造加工プロセスの最適化を行い評価する。

③センサー構造に関する研究

②と緊密に連携を取りながらセンサーの構造を検討し研究開発する。②で得られたノウハウを投入しダイヤモンドセンサーを製作し放射線照射前の電荷キャリア輸送特性評価を行う。初年度の準備期間を経て、2 年目に②で製作された素子評価を開始する。

2. 耐放射線センサー信号処理集積回路と核分裂中性子測定システムの開発は以下の 2 項目よりなる。

④耐放射線センサー信号処理集積回路の研究開発

本研究は、主に耐放射線トランジスタ開発とそれをベースとしたセンサー信号処理集積回路の開発である。耐放射線トランジスタ開発に関しては、商用 CMOS プロセスを用い異なった構造のトランジスタを製作/開発し耐放射線特性の評価を行う。センサー用信号処理集積回路の研究開発は、高レイトγ線環境下での信号処理の最適化を中心にデザインを開始し、耐放射線トランジスタの照射試験の結果を基に 2 年目から製作をはじめ、最終年度に完成をさせる。また、物質・材料研究機構 (NIMS) にて開発されたセンサーと接続し、放射線応答評価を実施する。ダイヤモンドセンサーとの接続試験に関しては、放射線を使用した試験以外に、高エネルギー加速器研究所 (KEK) の所有する白色レーザーを用いることで、ダイヤモンドセンサーの耐環境特性を詳細に測定し、白色レーザー光源の高強度化によって効率的に開発を進める。

⑤核分裂中性子測定システムの開発

2 年目から実施する中性子コリメータやγ線遮へいの仕様検討と具体化を行い、その後核分裂中性子測定システムのプロトタイプ製作を行う。KEK や日本原子力研究開発機構 (JAEA) の中性子校正場を用いて、水中を模擬した実験体系を構築し、熱から 14 MeV までの様々なエネルギーに対する中性子応答評価を行う。

3. 複合型センサーを搭載した水中ロボットによる遠隔計測技術の開発は以下の 2 項目よりなる。

⑥音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発

マルチフェイズドアレイ・ソナーと SBP に対して小型・軽量化に向けた研究開発を進める。ROV に搭載した場合の物理的、電気的問題点を検討し、実用上の課題を抽出する。外部施設を利用しγ線照射試験を行い、耐放射線性を調べる。

⑦原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発

ソナーシステムと中性子センサーから構成される複合センサーが搭載可能となるよう、NMRI が所有する ROV を改良する。原子炉格納容器を模擬した水槽などで水中ロボットによる遠隔計測技術の実証試験を実施し、今後の改良や実用化へとフィードバックする。遠隔制御技術としては、新たに水中 GPS や VR の技術等を検討する。

1. はじめに

1.1 研究の狙い

1F の廃炉を加速するためには、まずは燃料デブリの位置を把握して、通常の原子力発電所にはない放射性物質に起因するリスクを、継続的、かつ速やかに下げながら、廃炉工法を決定する必要がある。更に燃料デブリの取り出し時における作業員の安全を確保するためには、廃炉工法の各工程における燃料デブリの臨界性をなるべく正確に評価し、迅速に対策を施すことが重要となる。本研究では、このような 1F の炉内状況の把握、燃料デブリ取出しの早期実現、臨界リスク管理に資するため、原子力分野のみならず他分野の最先端技術を融合させ、これまでの原子力施設での作業環境に比べはるかに高い放射線環境下においても遠隔で動作する画期的な燃料デブリ探査用複合センサーの技術開発を行う。冠水した燃料デブリから放出される自発核分裂中性子に着目して、高γ線環境下においても動作するダイヤモンド中性子センサーの研究開発と、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置 (SBP) による水中探査技術の研究開発を行い、極限放射線環境下での中性子エネルギー分布測定技術に応用する。また、センサーの信号処理アナログ集積回路に用いる耐放射線トランジスタのデザインと照射試験や水中ロボット試験を通じて、遠隔制御による廃炉作業を支える耐放射線エレクトロニクスの基盤要素技術を確立させる。

1.2 背景

監視カメラやロボットなどの目に使用される CCD カメラなどのシリコン半導体センサーは放射線計測にも多く用いられるが、耐放射線性能が高くないため、高放射線環境下の原子炉内部調査には、不向きである。一方、ダイヤモンドは半導体センサー材料として優れた特性を持っており、特にワイドギャップ及び低誘電率により、高放射線環境下では他の半導体をしのぐ信号対雑音比を有する優れたセンサー材料である。現在ダイヤモンドを使用した素子研究は日本が世界をリードしており、世界一の高品質 CVD ダイヤモンド膜成長技術及びそれを使用した高精細高感度ダイヤモンドセンサー開発用のプロセス技術のノウハウは物質・材料研究機構が保有している。その保有技術によって作成される pin 型ダイヤモンド素子は、消費電力が低く有感領域の空乏層厚を容易に変えられるなど、汎用的な mim 型ダイヤモンド素子に比べて多くの優位性をもつ。また物質・材料研究機構の開発したダイオード等のデバイスは 3 MGy の放射線照射後も故障せず動作することが過去の研究から分かっている。

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では KEKB・LHC・J-PARC 等世界最強加速器の高放射線環境下で動作するセンサー信号処理用集積回路開発と実用化を行ってきた。その経験から、超微細 CMOS プロセスを用い、かつトランジスタ構造を変えることで、商用シリコン半導体プロセスを使用した集積回路でも 4 MGy もの高放射線環境下で安定に動作することが分かってきた。

一方、超音波や可聴音を利用する水中探査技術は、水中構造物の検査、河川や海底の 3 次元地形図の作成などに使用されている成熟度の高い技術であり、事故進展挙動解析等で燃料デブリの存在が示唆されている水没した PCV ペDESTAL 底などの堆積層表面の凹凸形状を高分解能で探索することができる。ただし、ソナー単体では放射線を計測す

ることはできないため、水中の対象物が燃料デブリか否かの迅速な判別ができない。また、セシウム 137 等の放射性物質で高レベルに汚染された水面下では、燃料デブリから放出される特性 γ 線の測定を狙ってもバックグラウンド γ 線に埋もれてしまい燃料デブリ位置の特定に至らない可能性がある。

以上の背景から我々は、燃料デブリから放出される自発核分裂中性子の計測に狙いをさだめ、高 γ 線環境下でも安定に動作する小型ダイヤモンドセンサーと中性子コンバータからなる中性子検出用センサーを開発し、海上・港湾・航空技術研究所/海上技術安全研究所 (NMRI) が開発を進めているマルチフェイズドアレイ・ソナーや SBP と組み合わせることで水面下にある燃料デブリの存在とその臨界リスクを迅速に「その場」で明らかにする遠隔探査技術の着想に至った。

1.3 研究構想

A) 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発

センサーの小型化の限界をみきわめるため 200 μm 角を目標としてサイズの最小化を目指す。また、 γ 線に対する感度を極限まで下げるため、ダイヤモンド結晶の厚さは 10 μm 厚程度として製造プロセスの改良を行う。センサーを B) で開発する集積回路と接合し α 線源等を用いて放射線検出器としての動作確認を行う。中性子コンバータと組み合わせることで中性子束が $10^2 \sim 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ の広いダイナミックレンジで動作可能であることを示す。

B) 耐放射線集積回路開発と核分裂中性子測定システムの開発

商用微細 CMOS プロセスを用いて耐放射線構造を持つトランジスタを開発し、1 MGy の γ 線照射においても正常に動作する事を確認する。また、その技術を高 γ 線環境下においてダイヤモンドセンサーの信号を読み出すための集積回路開発に応用する。また中性子コリメータや遮へい設計を行い、核分裂中性子測定システムとして組上げ、熱から 14 MeV の中性子照射試験によりその特性を評価する。

C) 複合型センサーを搭載した水中ロボットによる遠隔計測技術の開発

従来の水中ソナーの実用例に比べ狭い閉鎖空間となる 1F 原子炉格納容器への適用性を評価するとともに、水没した PCV ペデスタル底などの堆積層表面の凹凸形状を高分解能で確認できるようにする。また、燃料デブリが堆積層下部に埋没或いは岩塊中に含有している可能性も想定し、複数の周波数帯域のソナーシステムに対して技術開発を行う。ソナーシステムについても 1 kGy 程度の γ 線照射を行い動作可能な事を確認する。これまで行ってきた遠隔操作無人探査機・水中ロボット (ROV: Remotely Operated Vehicle) 開発の知見等も反映させ、格納容器を模擬したロボット試験用水槽等を使用した水中試験等により、実用化のための基礎データを取得する。

次に ROV にダイヤモンド中性子センサー、マルチフェイズドアレイ・ソナー及び SBP から構成される複合型センサーを搭載してデブリを探索・特定するための ROV の遠隔操作技術の開発・試験を実施する。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。



図 2.1-1 本業務の全体計画図

2.2 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法

平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法の概要を以下に示す。

(1) 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発

① 耐放射線トランジスタおよび集積回路の研究開発

1 MGy まで動作するトランジスタの開発を目標として、商用 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 65 nm 半導体プロセスを利用して、通常の構造を持つトランジスタと耐放射線性能を高めた構造を持つトランジスタを開発し、耐放射線試験が可能な評価サンプルを製作した。並行して中性子検出素子の生成する信号を処理するための高密度集積回路(中性子検出素子用信号処理集積回路)のデザインを開始した。

② 核分裂中性子測定システムの開発

国際廃炉研究開発機構 (IRID) が公表している 1F 原子炉格納容器内部の線量環境 (数 10 Gy/h) 下において、燃料デブリから放出される中性子を中性子束が $10^2 \sim 10^8$ n/cm²/s の広ダイナミックレンジで検知可能な核分裂中性子測定システムの開発を目標として、汎用粒子輸送計算コード PHITS を用いて中性子感度や γ 線影響の評価計算を行い、システム設計を開始した。

(2) 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発 (再委託先: 物質・材料研究機構)

① 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

高品質なダイヤモンド pin 構造を作製するために、{111} 単結晶基板表面での化学気相成長 (CVD) ダイヤモンド形成を行い、結晶成長品質を評価した。原子間力顕微鏡を用い、原子層ステップ観察でステップフロー成長の完全性を評価した。

② センサー形成プロセスに関する研究

センサーに用いるダイヤモンド pin 接合構造を形成するための準備として、反応性イオンエッチングによる構造加工試験を開始した。ダイヤモンド {111} 単結晶およびマスク材料に対するエッチングレートを実験的に導出した。

③ 中性子検出用センサー構造に関する研究

中性子コンバータ膜の材料として有効性が期待されるフッ化リチウム (LiF)、窒化ホウ素 (BN) のダイヤモンドセンサーに対する適性を検討するとともに、モンテカルロシミュレーションを用いて、放出される荷電粒子によるエネルギー付与から中性子コンバータの厚み、ダイヤモンド pin ダイオードの有感層厚さ指針値を決定した。

(3) 複合型センサーを搭載した水中ロボットによる遠隔計測技術の開発

(再委託先: 海上技術安全研究所)

① 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発

SBP を堆積層厚さが 15 cm より厚い場合においても探査可能となるように改良方法を検討

するとともに、水中ロボットへの搭載を想定し、マルチフェイズドアレイ・ソナーと SBP の小型軽量化を検討した。

② 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発

搭載する複合型センサーの形状、重量及び性能を考慮し、現有 ROV の改良方法を検討した。同時に原子炉格納容器環境の模擬に必要な設備及び治工具類を検討し、一部については設計・製作した。プラットホームにおいて、ROV から提供される大量の情報をサンプリングして、効率的にクラウドに送信するためのソフトウェアとゲートウェイを整備した。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

3. 平成 30 年度の実施内容及び成果

3.1 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発

3.1.1 耐放射線トランジスタおよび集積回路の研究開発

(1) 耐放射線トランジスタの開発研究

我々は 1 MGy で動作する耐放射線トランジスタの開発研究の初年度の目標として、耐放射線トランジスタ評価手法の確立と評価用トランジスタの開発を行った。構築したトランジスタ評価手法の確立を目的として、我々が保有していた CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いて開発されたトランジスタを使い耐放射線評価を量子科学技術研究開発機構（高崎量子研）にあるガンマ線照射施設で行った。我々の目標とする中性子検出素子用信号処理集積回路開発には多種類のトランジスタが必要となる。特に検出器信号処理用アナログ回路においては電離放射線吸収量（以降 TID と略す）によるトランジスタの閾値変化とソースドレイン間のオフリーク電流変化による動作不良、及び消費電力の増加が主要な問題となる。よってこれらのトランジスタ耐放射線評価には、トランジスタの特性を決定するパラメータ（幅：W、長さ：L など）が異なる多種類の CMOS トランジスタについてシステムティックなトランジスタ評価を行わなければいけない。また集積回路の使用環境を考えた場合、シングルイベント効果を発生する粒子線よりガンマ線のレートが 10^4 程度大きいこともあり、先端半導体プロセスで開発されたトランジスタの TID に対する性能変化が主要な研究課題となる。この評価を確実に効率よく短時間で行うために、本研究資金によりマトリックススイッチ（ケースレー半導体マトリックスカード 7072）を購入し我々の試験装置に組み込むことで試験効率をあげた。

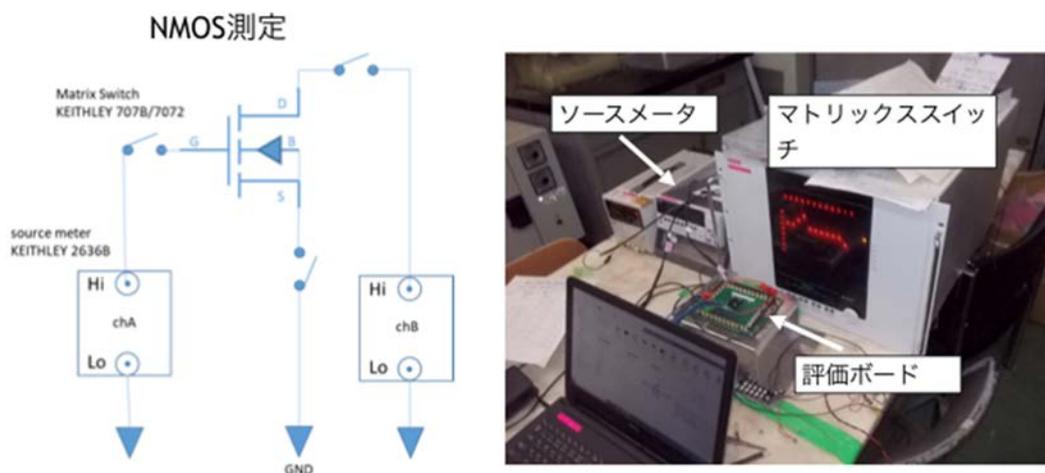


図 3.1.1-1 トランジスタ評価装置の写真と NMOS 測定時のセットアップ例

図 3.1.1-1 に評価システムの写真を示す。システムは、半導体パラメータアナライザとしてケースレー 2636B を採用し、マトリックススイッチによって複数あるトランジスタから評価対象トランジスタを選択しドレイン電流-ゲートソース電圧特性の測定を行うように構成されている。評価用のトランジスタは小型のプリント基板（評価ボード）

上の集積回路用ソケットにより交換し測定できるようにし、測定の再現性やサンプルによる違いを容易に測定できるようにしている。照射時にはこの小型プリント基板に挿入された評価用トランジスタチップに電圧を常時かけておき、照射後半導体アナライザとマトリックススイッチを使用しドレイン電流-ゲートソース電圧特性を測定する。

実際のガンマ線照射は、量子科学技術研究機構・高崎量子応用研究所のコバルト 60 照射施設・コバルト第 2 棟第 6 照射室にて行われた。照射線量率は SiO_2 換算で 750 kGy/h で総積分照射量は 0.947 MGy となった。また照射温度は室温である。セットアップおよび照射、照射後のトランジスタ試験を含め 9 日間をかけ、複数の積分照射量 (1 kGy、7.5 Gy、127 kGy、0.947 Mgy の 4 点) に対するそれぞれのトランジスタ特性を測定し、そのデータからトランジスタ閾値電圧とトランジスタのオフリーク電流を抽出した。

図 3.1.1-2 に評価ボードの詳細と照射時の写真を示す。左の図は評価ボードを照射用の治具に装着したときの写真である。プリント基板周辺に測定用コネクタと電源供給端子が配置されており、中央部に評価用トランジスタチップとチップ収納用ソケットが置かれている。この評価用トランジスタチップに垂直にガンマ線が当たるように治具を製作した。右図は照射を行う際のセットアップを上部からとった写真であり、写真の奥側から手前に向かってガンマ線が照射される。

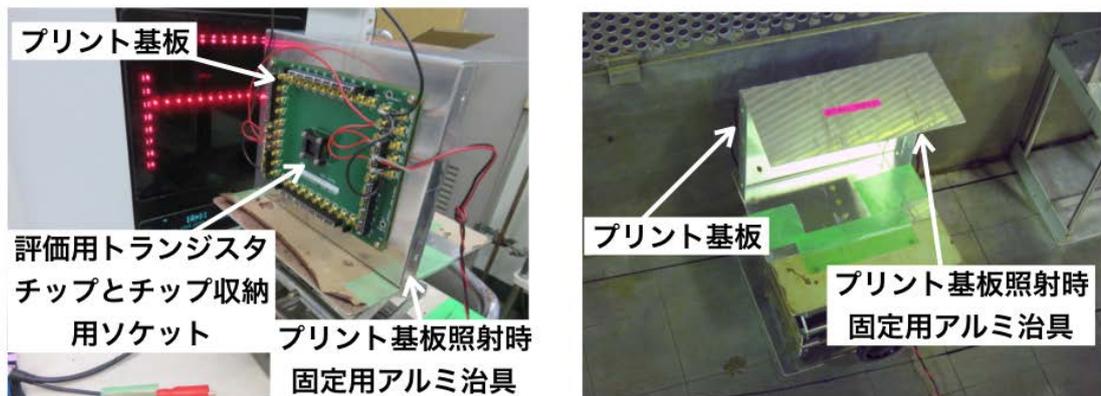


図 3.1.1-2 トランジスタ評価ボード（プリント基板、評価用トランジスタチップ、チップ収納用ソケットおよびコネクタ類）の写真とガンマ線照射時のセットアップ

トランジスタへの電圧の与え方としては、最大の照射損傷を与える条件であるドレインとゲート間の電圧は 0 V でゲートソース間の電圧は最大定格電圧をかけた状態でガンマ線照射評価が行われた。

前述のように平成 30 年度は耐放射線トランジスタ評価手法の確立を目的としてガンマ線照射施設へ試験装置を持ち込み積分照射量約 1 MGy まで照射を続けたが、以前の試験装置と比較し測定時間の大幅な短縮が可能となったため、以前のサンプル数と比較し倍以上のサンプル数の測定が可能になり、ガンマ線照射施設における短時間で効率的な測定環境が確立された。また評価手法として照射用トランジスタサンプルを実装する試験基板に使用される受動素子・集積回路ソケット等についても 1 MGy までの照射で電気

特性に問題がないことが確認できた。試験時における注意点として次のことが今回の予備実験から明確になった。ガンマ線照射直後の基板のチャージアップ等によるゲート破壊を防ぐための ESD 対策を施したトランジスタサンプルが必要である。特に CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いて製作されたトランジスタのうち最小の $L = 60 \text{ nm}$ のものに関しては、静電破壊対策がないトランジスタは評価中に動作不良を起こしやすいことが確認された。実際の集積回路に組み込んだ際は、外部入出力部に近いトランジスタは $L = 60 \text{ nm}$ のトランジスタを使用することはなく、また十分な対策を行うためこのようなことは起こらないが、トランジスタ単体の評価に関しては必ず必要になる。これは評価トランジスタデザインに生かされている。

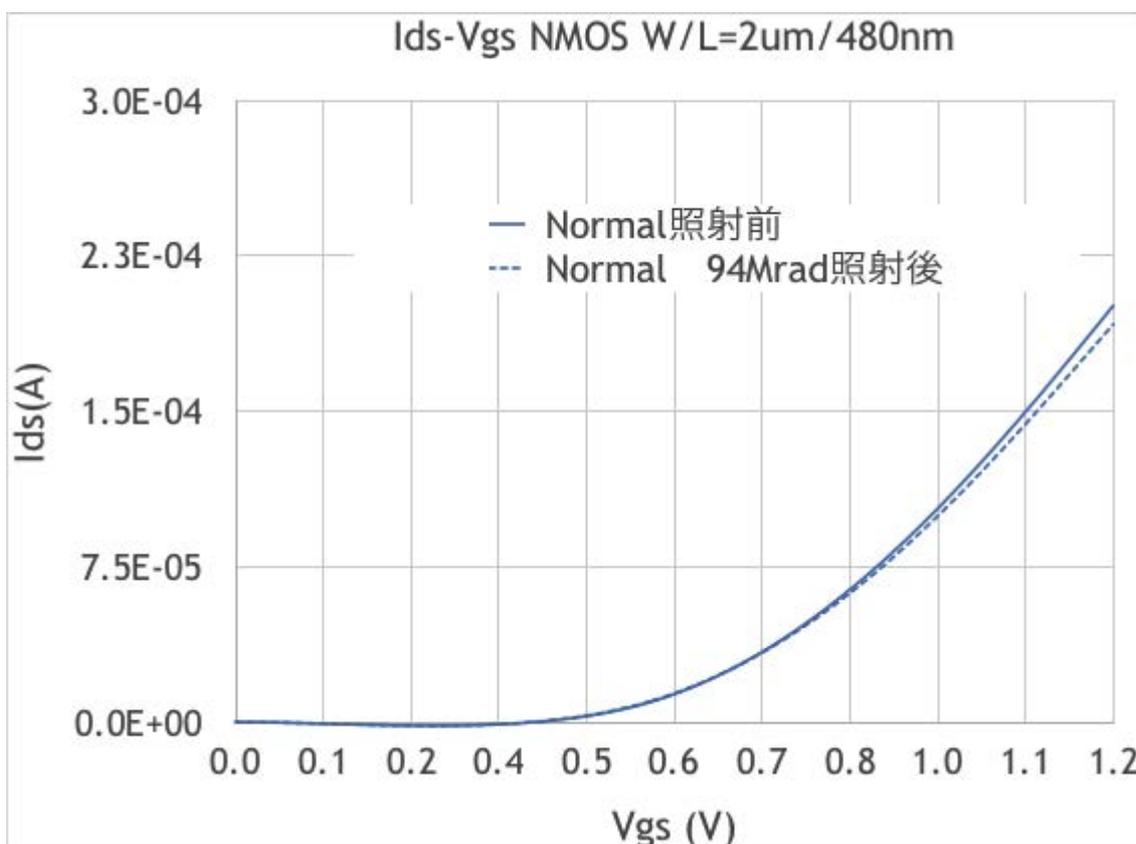


図 3.1.1-3 商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いたトランジスタ ($W/L=2 \mu\text{m}/480 \text{ nm}$) の放射線の影響
 実線は照射前のドレイン電流ゲートソース電圧特性で、点線は 0.94 MGy 照射後の特性

我々が保有していた CMOS 65 nm 半導体プロセストランジスタの照射結果について例を図 3.1.1-3 に示す。ここでは N 型 MOS トランジスタのゲートソース電圧とドレイン電流の特性を示す。実線が照射前で点線が 0.94 MGy 照射後のデータである。これを見るとわかるようにこのトランジスタの特性に関してはほとんど変化がない。このサンプルの場合、トランジスタの閾値電圧は照射前 0.398 V、照射後 0.397 V である。またトラ

ンジスタのドレインソースオフリーク電流は照射前 7 pA、照射後 48 pA であった。この差はマトリックススイッチボードの寄生容量およびケーブル等からくる測定誤差の範囲内と考えられるが、万が一トランジスタがオフの状態での電流が流れていたとしても集積回路の消費電力には大きな寄与はない。詳細な評価は今年度開発された評価用トランジスタチップで明確になるが、今回の予備データからは我々の選定した商用 CMOS 半導体プロセスで製作したトランジスタは 1 MGy で十分動作する可能性が高いことがわかる。このようにトランジスタ評価装置から取得されたデータよりトランジスタの閾値電圧を抽出し、積分照射線量に対する変化を示したものが図 3.1.1-4 である。ここで図 3.1.1-4 でのトランジスタの区別に略号を使用しているため説明を行う。NL6、NL48、NE6、NE48 はそれぞれ NMOS トランジスタのサンプルで、NL は通常の形状のトランジスタ、NE はエッジレストランジスタと呼ばれるソースドレイン間のリーク電流を低減させる構造を持つトランジスタである。アルファベットの後の数字はゲート長を表し 6 は 60 nm、48 は 480 nm を表す。PL6、PL48、PE6、PE48 はそれぞれ PMOS トランジスタのサンプルで、L、E、及び数字に関しては NMOS トランジスタのサンプルと同じ意味を持つ。また 1MGy の積分線量においてデータ点がないものは、測定中に静電破壊によって途中で測定ができなくなったものである。測定ができたものに関しては、どのトランジスタも 1 MGy まで特性の変化がないことがわかる。残念ながら前述の理由によりゲート長 L = 60 nm のトランジスタは測定時に動作不良を起こしたため 0.36 MGy までのデータしか残っていないが、0.36 MGy 照射後ではトランジスタの閾値電圧変化は 18% となり、プロセスばらつきによるトランジスタの閾値変動以下となっており集積回路デザイン上の支障はない。一般にゲート酸化膜の薄さによる耐放射線性能の向上は知られており、今回はそれを裏付ける結果を得た。

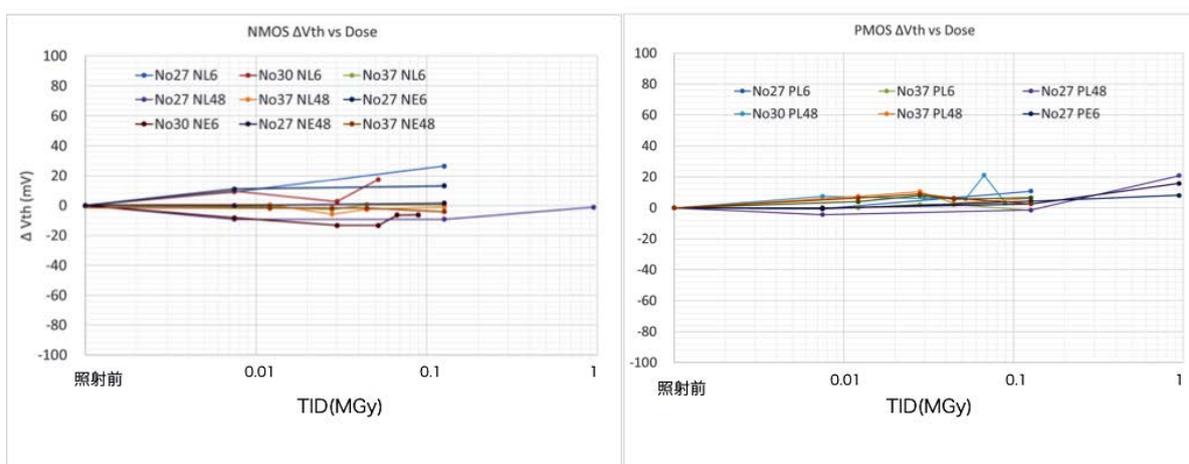


図 3.1.1-4 商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いたトランジスタの総積分放射線量に対する閾値電圧変化を測定した結果

使用したトランジスタサンプルは、本計画の資金を用いて開発されたものではなく、ノイズ評価のために静電破壊保護用素子をゲート等外部に接続する端子に配置していないため破壊されやすい。評価時には十分注意して評価を行ったが照射量と無関係に静電破壊によりトランジスタ不良がみられた。このためサンプル番号が連番になっていない。

的には、65 nm プロセスにおいてはゲート周りの不純物濃度を細かく調整しトランジスタ性能を上げておりそれは製造メーカーに依存しているため、この結果を全ての微細トランジスタへ当てはめることは注意を要する。我々の目的は 1 MGy まで耐えられる集積回路開発研究であるため、現在我々の使用している CMOS 65 nm 半導体プロセスの十分な耐放射線性能が確認できればよく、現状のデータは十分な耐放射線性能を示している。今年度の評価装置開発および予備実験によって次年度以降耐放射線トランジスタのシステマティックな評価を行う準備はできた。

以上の評価結果を基にした評価トランジスタデザインは終了し、96 種類のトランジスタの製造を終了し次年度に評価を開始する。トランジスタのゲート幅、ゲート長以外に閾値の異なるトランジスタ(ゲート直下のドーピング濃度を変化させトランジスタの閾値を調整している)やレイアウトの構造などを変化させデザインを行った。開発した評価用トランジスタを含んだレイアウトを図 3.1.1-5 に示す。今後は本トランジスタ評価チップの実装と評価用基板開発を完了した後、ゲート長が短いトランジスタ ($L = 60$ nm) の耐放射線特性を中心に測定を行う。

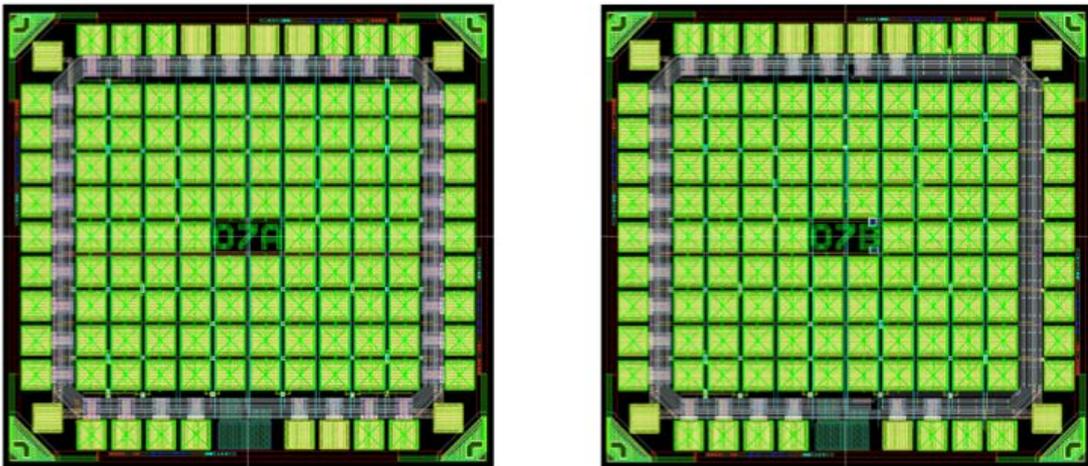


図 3.1.1-5 商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いたトランジスタ評価用チップ

2 種類のテストチップ中に 96 個のトランジスタを内蔵している(トランジスタのサイズ、閾値電圧、レイアウトの構造、保護ダイオードの有無に関する違いを含む)。チップを 1 周取り囲むようにしてワイヤをボンディングしていくことで多量のトランジスタを 1 チップ内に配置した。チップ 4 隅に電源パッドを配置することによってチップの中心に近いボンディングであったとしてもトランジスタへ電源電圧を供給可能とした。

(2) 中性子検出素子用信号処理集積回路の開発研究

今年度は評価トランジスタの開発製作と並行し、中性子検出素子用信号処理集積回路仕様に関して開発チーム内で数回合同会議にて議論し仕様検討を行った。その結果、中性子レートは 1 count/sec、ガンマ線レートは 1 Mcount/sec の環境で動作すること、

ガンマ線と中性子の波高弁別を行い、単位時間当たりのカウント数をカウンター値で出力すること、信号処理回路からのデジタルデータは海洋技術安全研究所の ROV 内に置かれた FPGA に送られデータ処理されることで開発を進めることとした。

このうち信号対雑音比を決める重要なパラメータである検出器の厚さと検出器容量はそれぞれ $1\ \mu\text{m}$ 以上、 $5\ \text{pF}$ (検出器容量は $2\ \text{pF}$ で実装等による寄生容量を大きめに見積もり全体で $5\ \text{pF}$ とした) として中性子検出器用信号処理回路の開発を進めることとした。これら仕様検討およびデザインと並行して次年度以降中性子検出器用信号処理回路に使用できそうな回路要素開発も並行して進めた。具体的には GHz 帯広帯域電流電圧変換増幅器、完全差動オペレーショナルアンプ、閾値自動補正機能付きコンパレータ、デジタルアナログ変換器、アナログデジタル変換器、デジタル入出力回路等について商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを利用し開発した。次年度から動作試験および耐放射線評価を行う。図 3.1.1-6 に製作した集積回路の一部を示す。

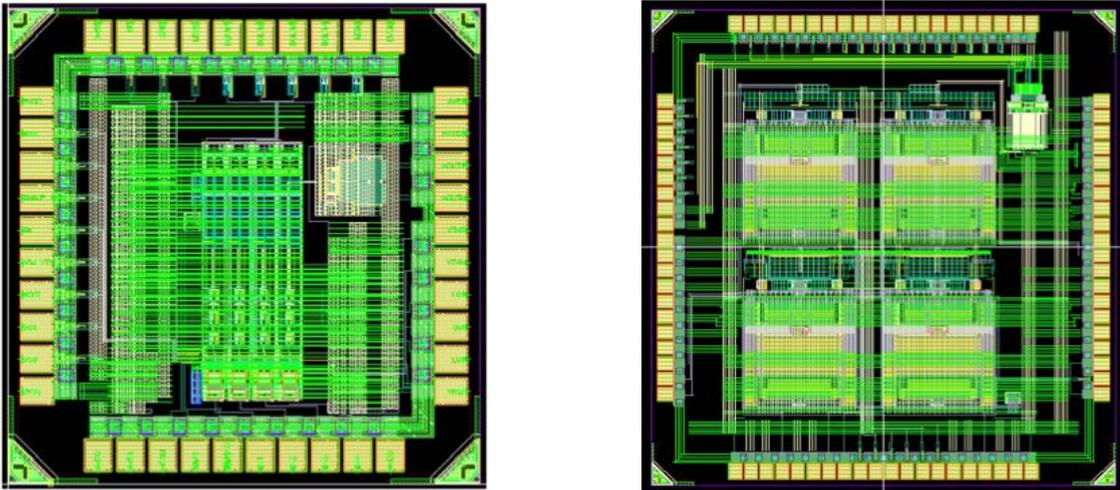


図 3.1.1-6 商用 CMOS 65 nm 半導体プロセスを用いて開発した種々の回路要素

左のチップはテストチップ中に GHz 帯電流電圧変換増幅器、閾値自動調整機能を持つコンパレータ、デジタルアナログコンバータ、外部入出力用デジタル回路を含む。右の評価用チップは完全差動オペアンプ、アナログデジタルコンバータ、デジタル制御回路、周波数発振回路を含んでいる。

3.1.2 核分裂中性子測定システムの開発

国際廃炉研究開発機構（IRID）が公表している 1F 原子炉格納容器内部の線量環境（数 10 Gy/h）下において、燃料デブリから放出される中性子を中性子束が $10^2 \sim 10^8$ n/cm²/s の広ダイナミックレンジで検知可能な核分裂中性子測定システムの開発を目標として、汎用粒子輸送計算コード PHITS を用いて中性子感度や γ 線影響の評価計算を行った。

平成 30 年度は、来年度以降に実施する核分裂中性子測定システムの設計準備期間として位置付け、システム設計に必要な計算環境を整備するとともに、ダイヤモンド検出器の γ 線に対する感度評価を行った、また、実測値を反映した粒子輸送モンテカルロ計算用の 3 次元モデルを構築するため、今年度に購入した Cividex 社製ダイヤモンド検出器のモデリングを行い、熱中性子線源による試解析を行った。以下にその具体的な内容を記述する。

(1) 計算環境の整備

核分裂中性子測定システムの設計は、日本原子力研究開発機構（JAEA）が中心となって開発を進めている汎用粒子輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) [3.1.2-1]の最新バージョン（version 3.10）を用いて行うこととした。PHITS は、あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コードであり、現在、放射線施設的设计、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の様々な分野で利用されており、その信頼性が高く評価されている。KEK や SLAC 国立加速器研究所等で開発・改良が進められている電磁カスケードコード EGS5[3.1.2-2]が近年、PHITS に組み込まれ、 γ 線や電子線の輸送計算に対しても高精度なシミュレーションが可能となった。中性子の輸送計算に用いる核データとしては、PHITS に付属している JENDL-4.0 [3.1.2-3]を用いることとした。JENDL-4.0 は、JAEA が継続的に評価を進めている高速炉、熱中性子炉の設計・解析、核融合炉中性子工学、中性子遮蔽計算などに利用できる国産標準核データライブラリであり、406 核種の中性子入射反応データが収録されている。入射中性子エネルギー範囲も 10^{-5} eV \sim 20 MeV であり、核分裂中性子測定システム設計に最適と考えられる。核分裂中性子測定システムの最適化には多くのパラメータを変えた計算を行う必要があるため、高エネルギー加速器研究機構が所有する大型計算機システムを利用することで、現実的な時間スケールで効率的に計算を実施できる環境を整備した。PHITS の実行ファイルについては、最新のインテルコンパイラー（version 2019）によって PHITS コードのソースファイルからコンパイルを行い、通常計算用と MPI (Message Passing Interface) による並列計算用を作成し、必要とされる試行回数に応じて使い分けることとした。大型計算機システムへの計算ジョブの投入は、IBM 社の Platform Load Sharing Facility (LSF)を利用したシェルスクリプト等を作成することで、効率的に実施した。

(2) 中性子感度に対する試解析

本課題で提案する核分裂中性子測定システムは、数 10 Gy/h という極限放射線環境下において、燃料デブリから放出される自発核分裂中性子を検出することを目標としている。目標を達成するために特に重要であるのは、低い計数率が予想される中性子起因の信号と非常に高い計数率が予想される γ 線起因の信号の弁別と γ 線バックグラウンドの低減である。中性子起因の信号と γ 線起

因の信号を弁別するため、中性子検出には、熱中性子反応断面積と反応後の放出エネルギーが共に大きい ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応あるいは ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応を中性子-荷電粒子変換（中性子コンバータ）反応として採用する。また、中性子を荷電粒子に変換することで、荷電粒子と二次電子（ γ 線から生成）の阻止能の違いから、検出器の有感層の厚みを荷電粒子の飛程程度にまで薄くすることで、荷電粒子の感度を下げることなく、 γ 線に対する感度を大きく下げることが期待できる。図 3.1.2-1 にアメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology, NIST）が提供する電子や陽子、 α 粒子の阻止能のデータベース[3.1.2-4]から取得した密度 2.0 g/cm^3 のアモルファス炭素に対する電子と α 粒子の阻止能を示すが、 $0.1\sim 2\text{ MeV}$ の領域において 2 桁以上の違いがあることが分かる。

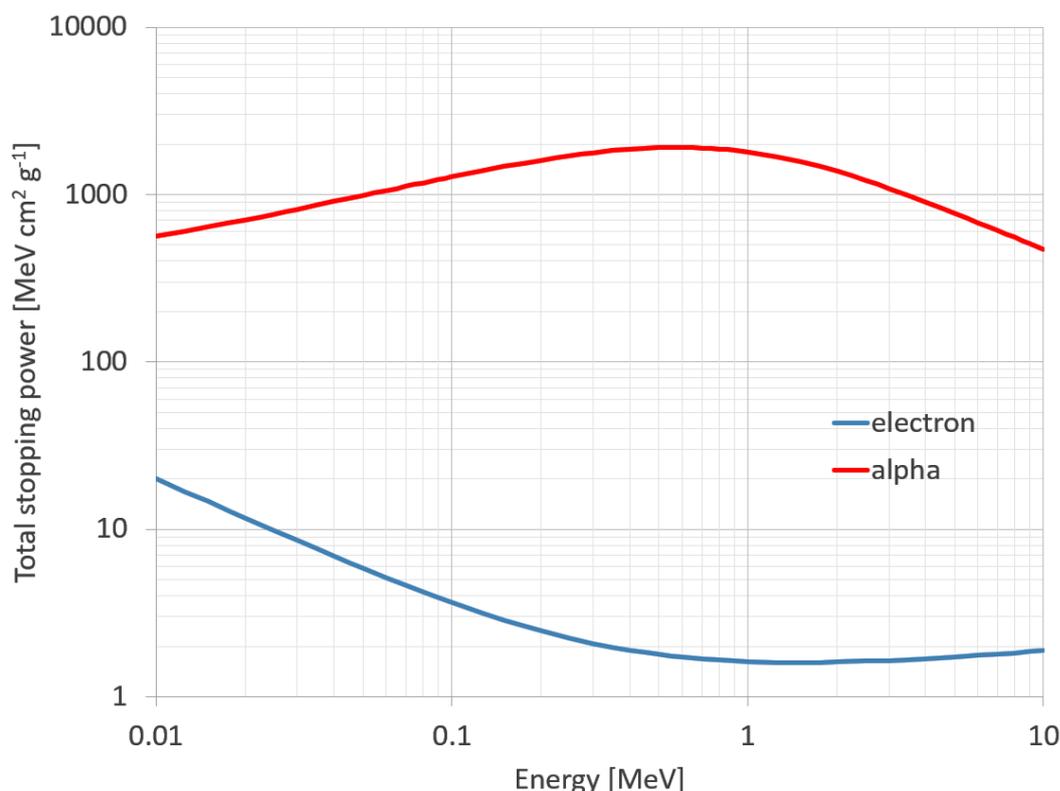


図 3.1.2-1 炭素に対する電子と α 粒子の阻止能

中性子コンバータに用いる ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応と ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応の熱中性子吸収断面積と発熱エネルギー (Q 値) を表 3.1.2-1 にまとめる。 ${}^6\text{Li}(n_{\text{th}}, t)\alpha$ 反応によって放出される ${}^3\text{H}$ と α 粒子のエネルギーは、それぞれ 2.73 MeV 、 2.05 MeV となる。一方、 ${}^{10}\text{B}(n_{\text{th}}, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応によって放出される α 粒子のエネルギーは、残留核となる ${}^7\text{Li}$ の励起準位によって異なり、 1.47 、 1.78 MeV となる。 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応は ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応と比べると放出粒子のエネルギーは低い、熱中性子吸収断面積は 4 倍ほど高いため、中性子検出効率の観点で有望である。図 3.1.2-2 に飛程簡易計算ソフト SRIM-2013 コード[3.1.2-5]を用いて計算した炭素（密度 3.5 g/cm^3 ）に対する ${}^3\text{H}$ と α 粒子の飛程を示す。 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応によって放出される ${}^3\text{H}$ と α 粒子のダイヤモンド（密度 3.5 g/cm^3 ）中の飛程はそれぞれ $21\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 以下と評価される。一方、 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応によって放出される α 粒子のダイヤモンド（密度 3.5 g/cm^3 ）中の飛程はそれぞれ $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下と評価される。

表 3.1.2-1 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応と ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応の熱中性子吸収断面積と発熱エネルギー (Q 値)

反応	熱中性子 (0.025 eV) 吸収断面積 [b]	Q 値 [MeV]
${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$	941	4.78
${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	3841	2.79

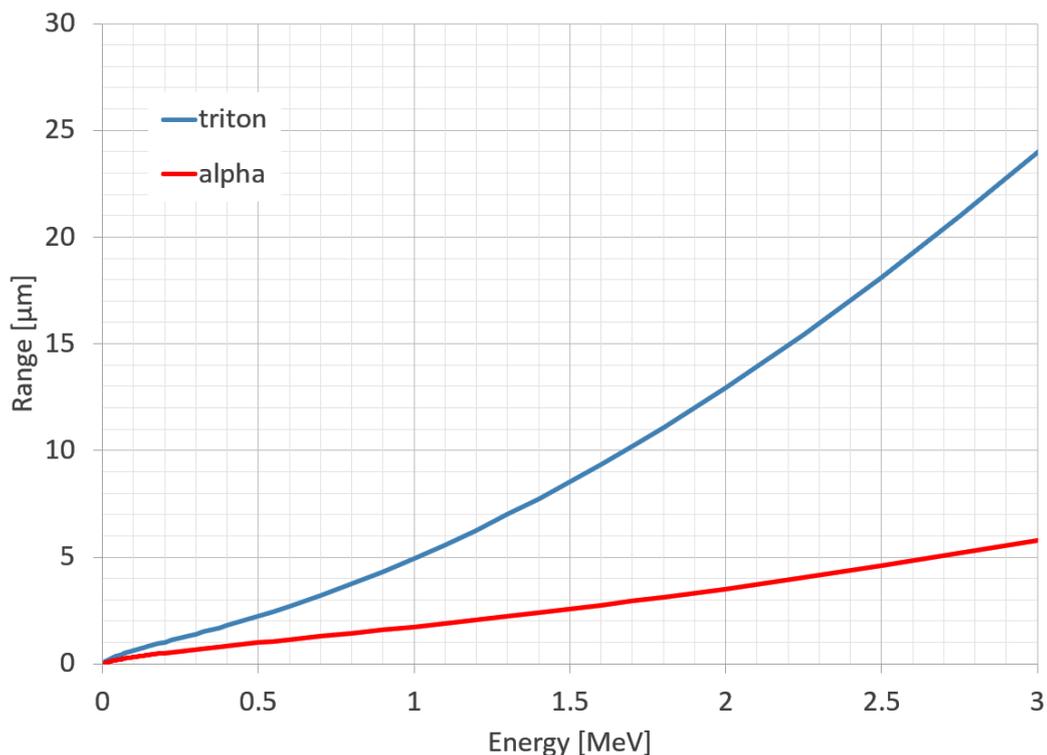


図 3.1.2-2 炭素 (密度 3.5 g/cm^3) に対する ${}^3\text{H}$ と α 粒子の飛程

中性子コンバータ膜の材料としては、フッ化リチウム (LiF)、窒化ホウ素 (BN) が候補であるが、放出される荷電粒子の飛程が中性子コンバータの厚み、ダイヤモンド検出器の有感層の厚みを決定する目安となる。

PHITS シミュレーションの妥当性の検証や粒子輸送モンテカルロ計算用の 3 次元モデルの構築を行うため、Cividec 社製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C[3.1.2-6] のモデリングを行い、熱中性子線源照射に対する試解析を行った。Cividec 社製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の構造パラメータを表 3.1.2-2 に、外観図を図 3.1.2-3 に、内部構造を図 3.1.2-4 にそれぞれ示す。B6-C では中性子コンバータとして $1.9 \mu\text{m}$ 厚の $95\%{}^6\text{Li}$ のフッ化リチウム (LiF) を用いており、 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応で放出される ${}^3\text{H}$ と α 粒子を $140 \mu\text{m}$ 厚のダイヤモンドセンサーで検出する仕様となっている。

表 3.1.2-2 Cividec 社製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の構造パラメータ

Detector type	Compact Thermal-Neutron Diamond Detector
Substrate material	sCVD diamond
Substrate thickness	140 μm
Active area	10 mm^2
Neutron converter	^6LiF , 95% enriched in ^6Li , thickness 1.9 μm
Operation voltage	$\pm 120\text{ V}$
Packaging	RF tight



図 3.1.2-3 Cividec 社製熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の外観図

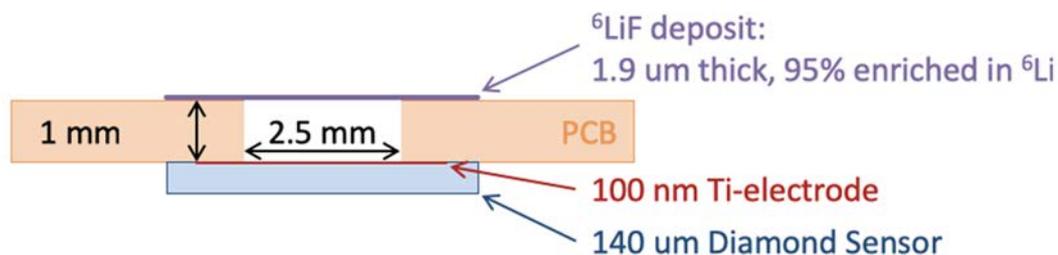


図 3.1.2-4 熱中性子測定用ダイヤモンド検出器 B6-C の内部構造

γ 線または中性子がダイヤモンド検出器を構成する物質との相互作用することによって生じる二次電子や荷電粒子に対しても輸送計算を行うことにより、検出器の有感層におけるエネルギー付与分布を求めることができる。

計算では先ず、図 3.1.2-3 に基づき、PHITS の入力データを作成し、その描画機能を用いて想定どおりの形状が再現できるかどうかを確認した。図 3.1.2-5 に示すように、想定どおり形状が再現され、今回作成した入力データの妥当性が確認できた。

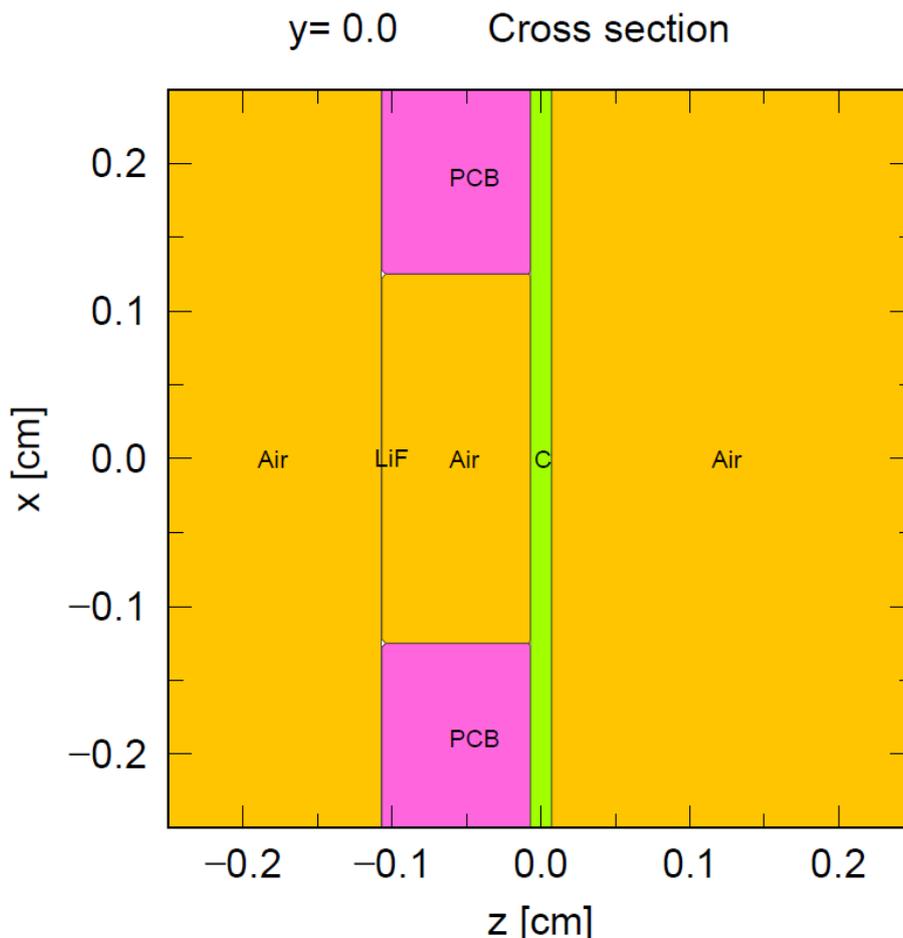


図 3.1.2-5 PHITS 描画機能による体系モデルの確認結果

体系入力データの確認後、PHITS が 0.025 eV の単色中性子線源から ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応によって ${}^3\text{H}$ と α 粒子を生成し、それらがダイヤモンド検出器に付与するエネルギー分布の計算が正常に行えるかどうかを確認した。計算ではイベントジェネレーターモデル (e-mode=2) を用いることで、Q 値に基づいて一意に決まる放出粒子と運動量の相関を考慮した。図 3.1.2-6 に LiF (95% ${}^6\text{Li}$) 部で生成した粒子のエネルギー分布を示す。 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応によって放出される ${}^3\text{H}$ と α 粒子のエネルギーが、それぞれ 2.73 MeV、2.05 MeV となっていることが確認できる。図 3.1.2-7 に ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応によって放出される ${}^3\text{H}$ と α 粒子のフラックス分布を示す。空気層では粒子の飛程が長くなるフラックス分布が幅広く伸びているが、一旦物質に入射するとごく浅い部分で停止していることが確認できる。図 3.1.2-8 にダイヤモンド検出器部でのエネルギー付与分布を示す。 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応によって放出される ${}^3\text{H}$ と α 粒子のエネルギー付与分布は図 3.1.2-9 に示す Cividec 社が提供する熱中性子測定用ダイヤモンド検出器の波高スペクトル[3.1.2-6]を良く再現している。これらの図より、定性的に妥当な結果が得られており、来年度から本格化する核分裂中性子測定システム的设计計算も正常に行えるものと判断した。

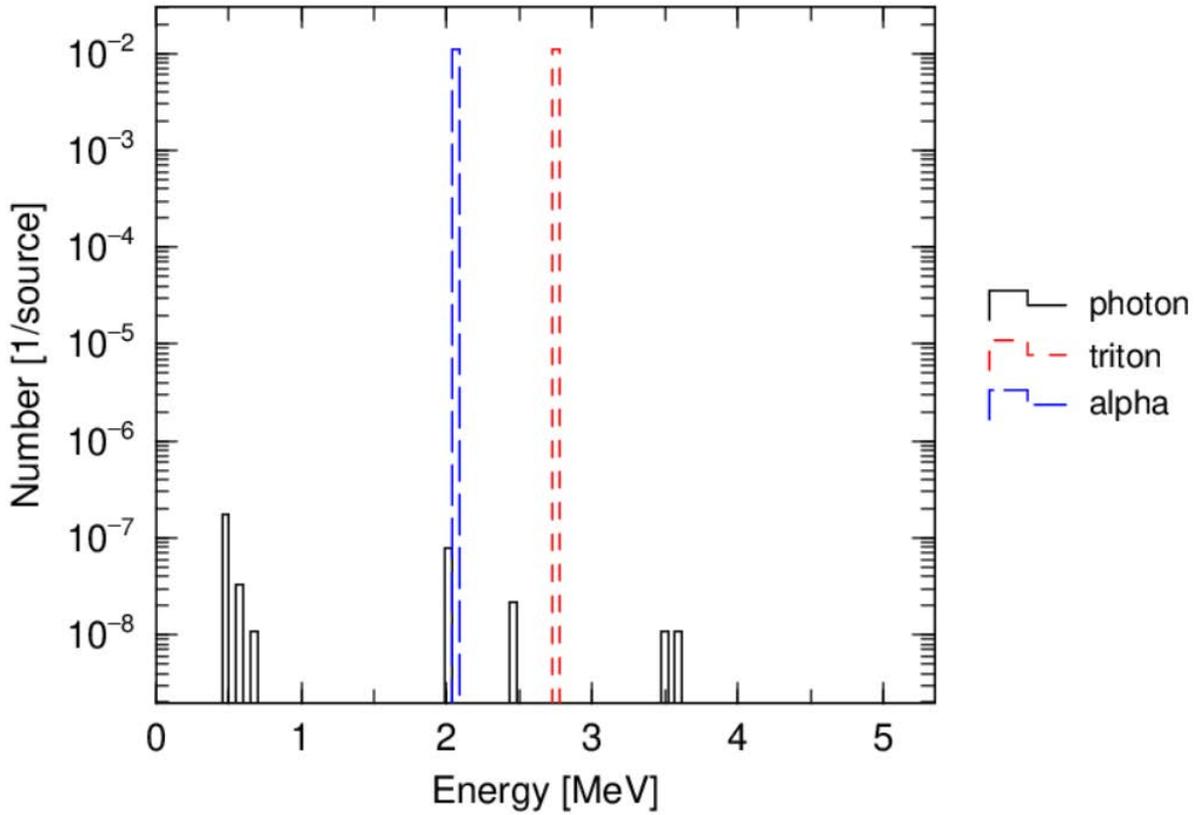


図 3.1.2-6 PHITS による試解析結果の例 (${}^6\text{LiF}$ 部で生成粒子のエネルギー分布)

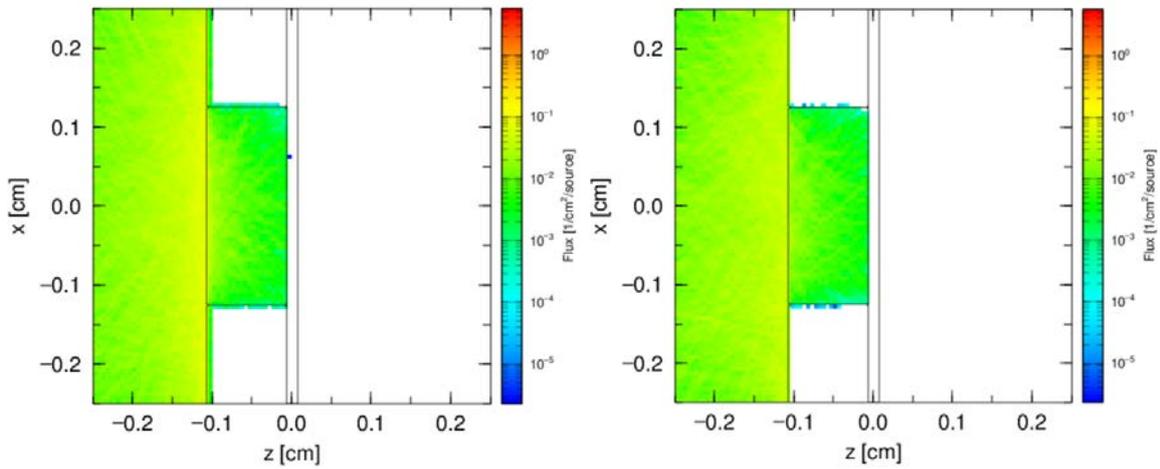


図 3.1.2-7 PHITS による試解析結果の例 (${}^6\text{LiF}$ 部で生成する ${}^3\text{H}$ (左図) と α 粒子 (右図) のフラックス分布)

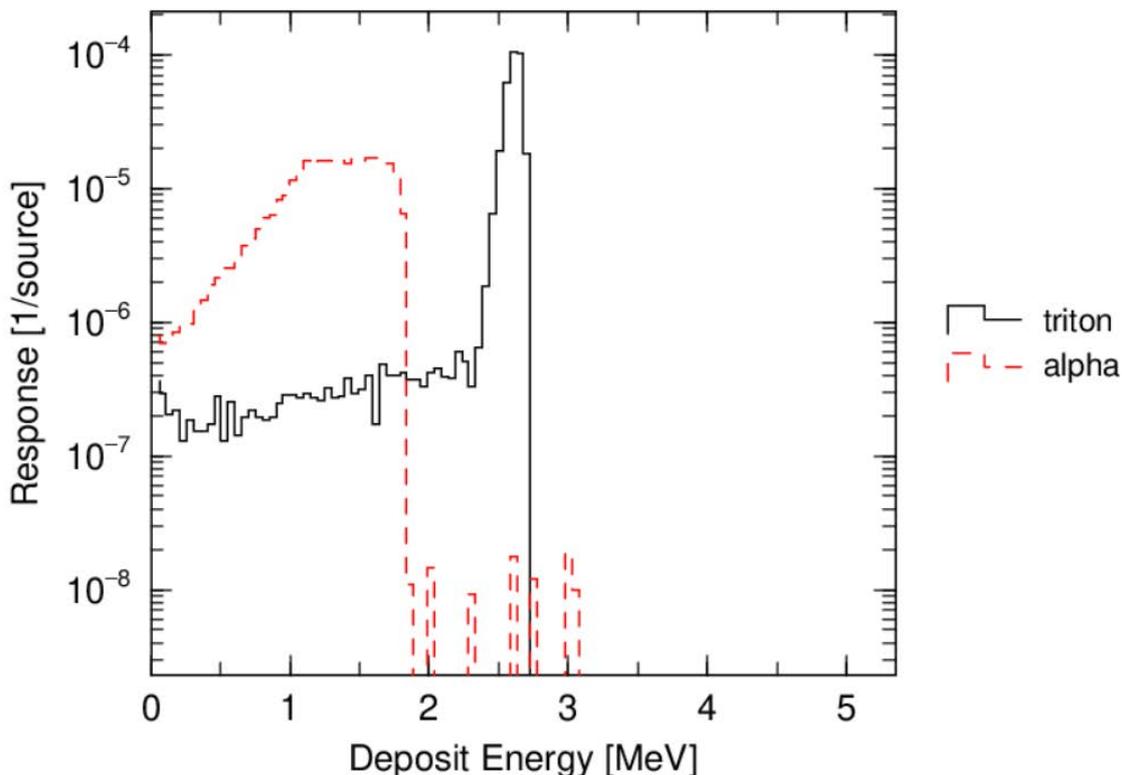


図 3.1.2-8 PHITS による試解析結果の例（ダイヤモンド検出器部でのエネルギー付与分布）

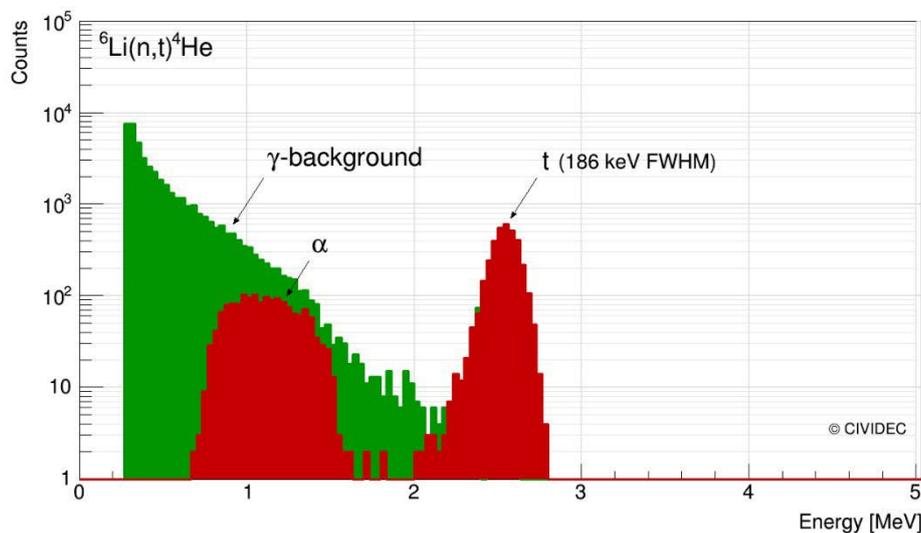


図 3.1.2-9 Cividec 社が提供する熱中性子測定用ダイヤモンド検出器の波高スペクトルの例
[3.1.2-6]

(3) γ 線影響評価

ダイヤモンド検出器の γ 線に対する感度を、PHITS を用いて評価した。IRID による事故進展解析[3.1.2-7]や 1F1 号機の滞留水分析[3.1.2-8]の結果から、原子炉格納容器の内部は Cs による表面汚染が主要な γ 線源であると考えられるため、 ^{137}Cs から放出される γ 線によるダイヤモンド検出器へのエネルギー付与分布計算を基に、炉内環境の γ 線影響について検討した。200 μm 角

と 5 mm 角のダイヤモンド検出器の簡易モデル（炭素 100%、密度 3.5 g/cm³）を PHITS で作成し、厚さを 1 μm から 500 μm まで変化させて、¹³⁷Cs からの γ 線（662 KeV）によるエネルギー付与を計算した。γ 線は、ダイヤモンド検出器のサイズに合わせて 200 μm 角または 5 mm 角の 662 keV の単色エネルギーの面線源とし、変化させる厚さ方向に入射させた。計算結果を検出器サイズごとに、図 3.1.2-10～3.1.2-15 に示す。検出器厚さを厚くすればするほど、γ 線のエネルギー付与分布は高エネルギー側にシフトしていき、5 mm×5 mm×500 μm においては明確なコンプトンピークが確認された。この結果から γ 線の感度は検出器の有感領域を小さくすることで低減させることが可能であり、有感層の厚みを中性子コンバータで生成される荷電粒子の飛程程度にまで薄くすることで、荷電粒子の感度を下げることなく、γ 線に対する感度を大きく下げることが期待できる。⁶Li(n, t) α 反応によって放出される ³H を利用する場合は、ダイヤモンド検出器中の飛程から有感層を 21 μm 程度まで薄くすることが有効であり、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応によって放出される α 粒子を利用する場合は 3.1 μm 程度まで有感層を薄くすることが有効である。

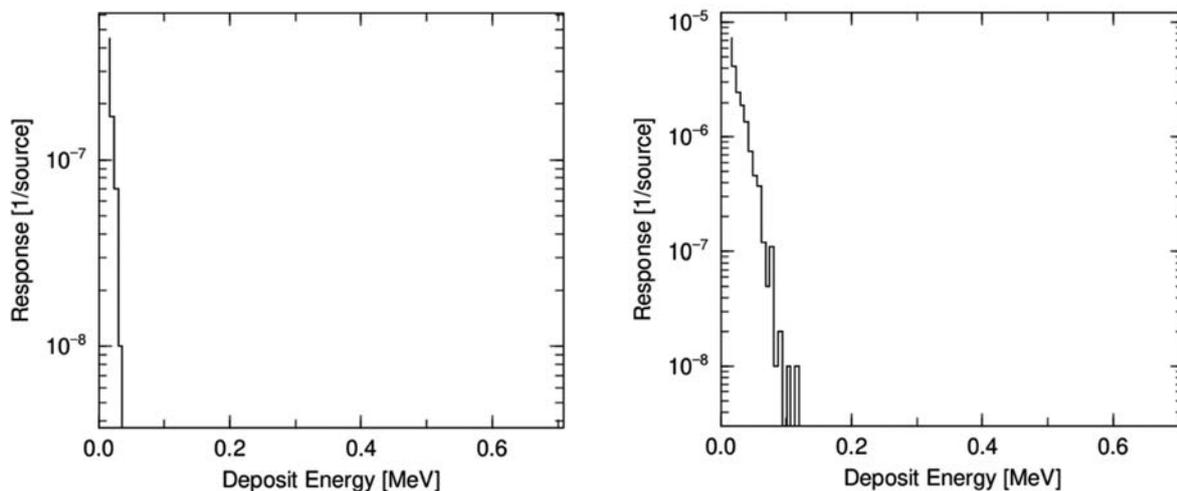


図 3.1.2-10 ダイヤモンド検出器の ¹³⁷Cs からの γ 線（662 KeV）によるエネルギー付与分布 左図は 200×200×1 μm 厚、右図は 200×200×5 μm 厚

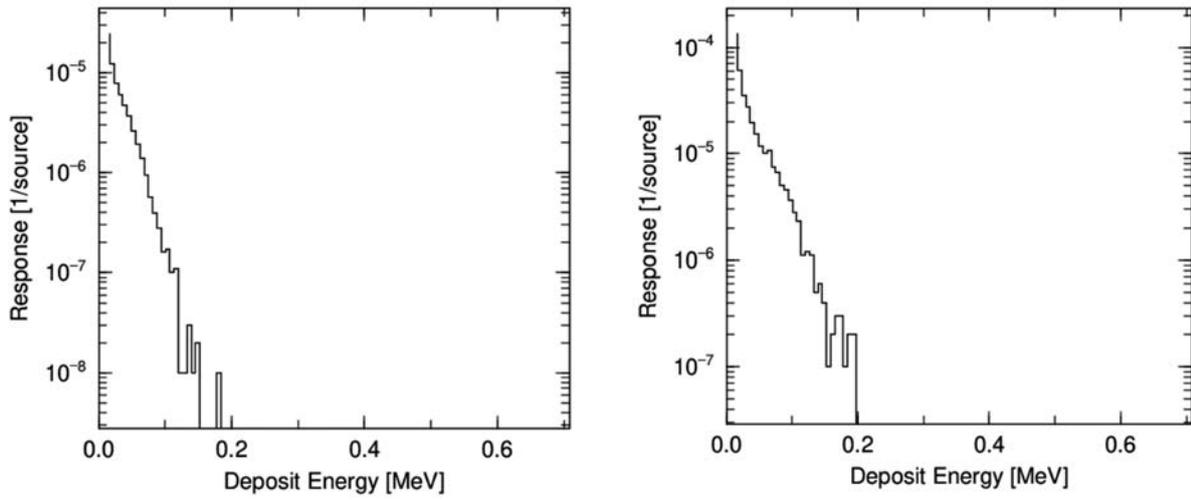


図 3.1.2-11 ダイヤモンド検出器の ^{137}Cs からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $200 \times 200 \times 10 \mu\text{m}$ 厚、右図は $200 \times 200 \times 25 \mu\text{m}$ 厚

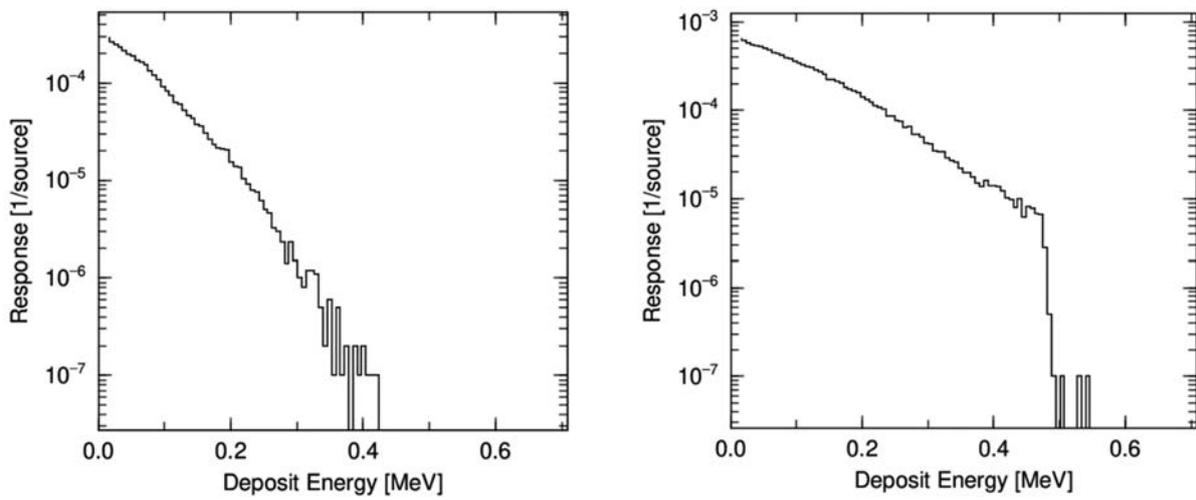


図 3.1.2-12 ダイヤモンド検出器の ^{137}Cs からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $200 \times 200 \times 140 \mu\text{m}$ 厚、右図は $200 \times 200 \times 500 \mu\text{m}$ 厚

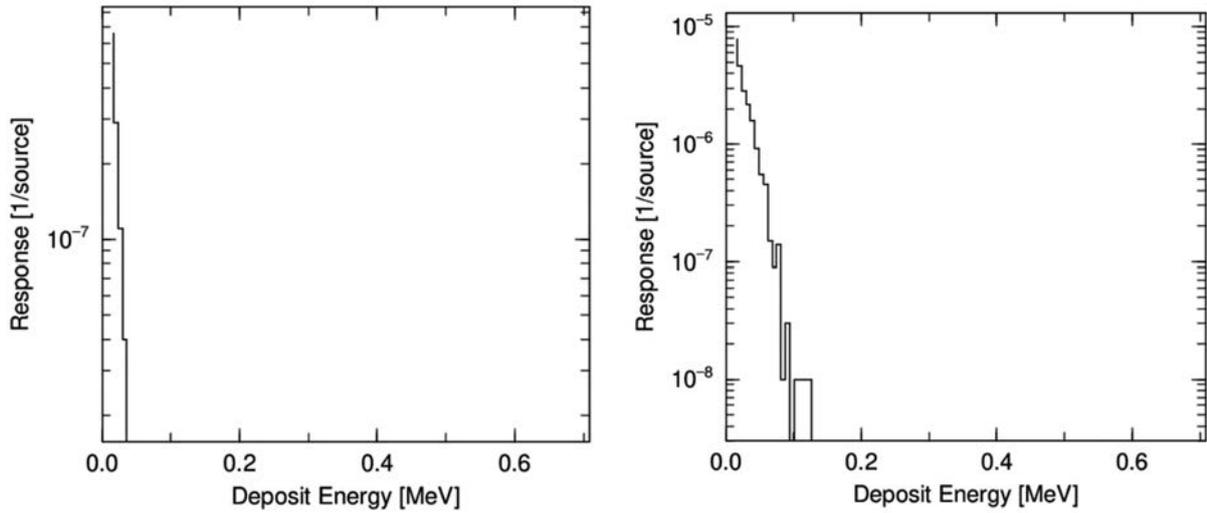


図 3.1.2-13 ダイヤモンド検出器の ^{137}Cs からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\ \mu\text{m}$ 厚、右図は $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\ \mu\text{m}$ 厚

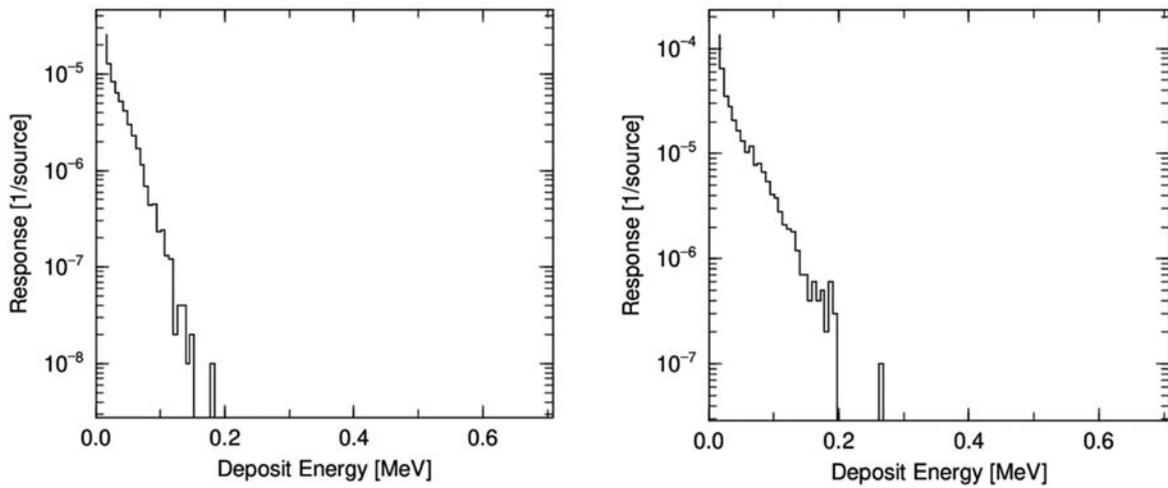


図 3.1.2-14 ダイヤモンド検出器の ^{137}Cs からの γ 線 (662 KeV) によるエネルギー付与分布 左図は $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 10\ \mu\text{m}$ 厚、右図は $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 25\ \mu\text{m}$ 厚

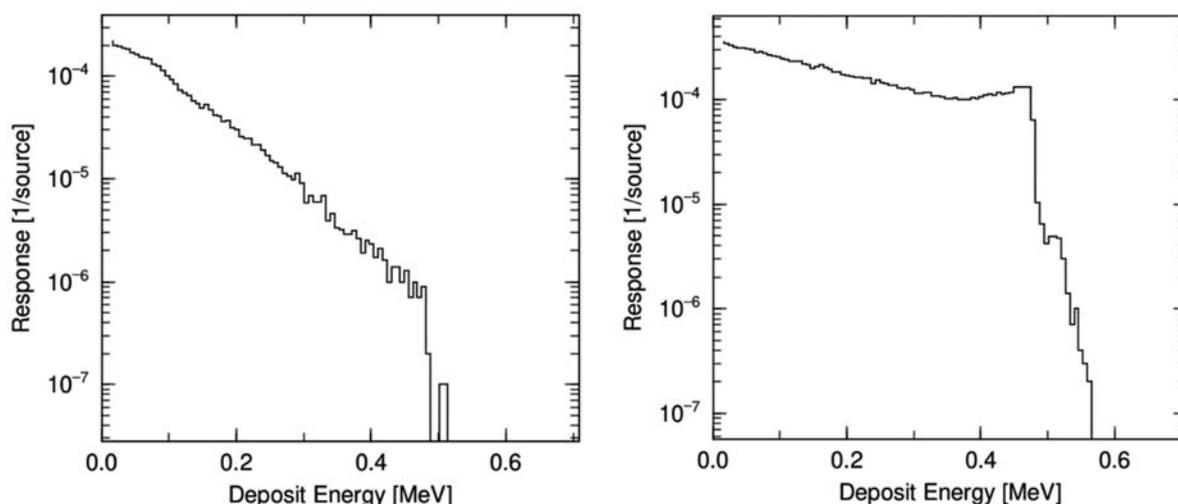


図 3.1.2-15 ダイアモンド検出器の ^{137}Cs からの γ 線(662 KeV)によるエネルギー付与分布 左図は5 mm×5 mm×140 μm 厚、右図は5 mm×5 mm×500 μm 厚

(4) パイルアップ評価

燃料デブリ探索では、数 10 Gy/h という極限放射線環境下でのセンサー使用が想定される。数 10 Gy/h の線量率領域では、 $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度のフラックスで γ 線がセンサーに入射することに等価であるので、 γ 線感度が低いことに加えて、時間応答の早い検出器が求められる。一方で、燃料デブリからの中性子フラックスはあまり高くないことが想定されており、センサーには中性子感度が高く、 γ 線起因の信号と中性子起因の信号を明確に弁別できることが求められる。我々は、熱中性子断面積の大きい ^6Li や ^{10}B を中性子コンバータとして用い、検出器の有感層の厚みを中性子コンバータで生成される荷電粒子の飛程程度にまで薄くし、中性子起因の荷電粒子によるエネルギー付与と γ 線起因の二次電子によるエネルギー付与の違いから γ 線起因の信号と中性子起因の信号を弁別することとした。極端な例では、 γ 線の計数率を 10^6 cps、中性子の計数率を 1 cps として、計数率で 10^6 程度の差がある場合でも十分な弁別能力が必要とされる。 $^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反応によって放出される ^3H を利用する場合は、有感層が 21 μm 程度のダイアモンド検出器を利用することが有効である。(3) γ 線影響評価の計算結果によると 25 μm 厚のダイアモンド検出器の γ 線のエネルギー付与の最大値は大よそ 0.3 MeV であり、 ^3H によるエネルギー付与のピーク領域と比べると 7 倍以上の開きがある。一方、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応によって放出される α 粒子を利用する場合は 3.1 μm 程度まで有感層を薄くすることが可能である。5 μm 厚のダイアモンド検出器の γ 線のエネルギー付与の最大値は大よそ 0.1 MeV であり、コンバータ-検出器間のエネルギー損失にも依存するが、 α 粒子によるエネルギー付与と比べると 4 倍以上の開きがある。

後段の信号処理回路にもよるが、ダイアモンド検出器は 10 ns 程度の時間分解能が期待される。この時間分解能で下記に示す Blatt の式[3.1.2-9]を用いてパイルアップ事象の評価を行った。

$$N_n = \frac{N_1}{n} (1 - e^{-N\tau_p}) (1 - e^{-N\tau_p/2})^{n-2}, \dots [n > 1]$$

ここで、n はパイルアップ度数、N₁ はパイルアップがない場合の信号の数、N_n は n 重にパイルアップした場合の信号の数、N は真の計数率、τ_p は信号の時間幅を表す。

極端な例として検出器の信号を 10⁶ cps、10 ns の時間幅とすると、パイルアップ割合 (N_n/N₁) は表 3.1.2-3 のように表わされる。この結果から中性子起因の信号と γ 線起因の信号の計数率が 10⁶ 程度の差があっても、波高比が 4 倍以上あれば、γ 線起因の信号のパイルアップ信号と中性子起因の信号の計数率比は 1 対 0.062 となり、95%以上の確率で弁別が可能である。

表 3.1.2-3 真の計数率を 10⁶ cps、信号の時間幅を 10 ns とした場合のパイルアップ割合

(N _n /N ₁)	
n	N _n /N ₁
2	5.0 × 10 ⁻³
3	1.7 × 10 ⁻⁵
4	6.2 × 10 ⁻⁸

参考文献

- [3.1.2-1] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 2.52,” J. Nucl. Sci. Technol. 50(9), 913-923 (2013)
- [3.1.2-2] H. Hirayama, Y. Namito, A. F. Bielajew, S. J. Wilderman, and W. R. Nelson, “The EGS5 Code System”, KEK Report 2005-8, SLAC-R-730, High Energy Accelerator Research Organization(KEK), Stanford Linear Accelerator Center(SLAC), 2005(2005)
- [3.1.2-3] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura, “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering,” J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).
- [3.1.2-4] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler and J. P. Biersack, “SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010)”, Nucl. Instrum. Meth. B 268 (11), 1818-1823 (2010).
- [3.1.2-5] M. J. Berger, “ESTAR, PSTAR, ASTAR - A PC Package for Calculating Stopping Powers and Ranges of Electrons, Protons and Helium Ions, Version 2”, IAEA-NDS-144 (1993).

- [3.1.2-6] Cividec instrumentation 社ホームページ
<https://cividec.at/index.php?module=public.product&idProduct=17&scr=0>
- [3.1.2-7] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID), 一般財団法人 エネルギー総合工学研究所 (IAE), “平成 26 年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 (事故進展解析及び実機データ等による炉内状況把握の高度化) 完了報告書, 平成 28 年 3 月.
- [3.1.2-8] 東京電力株式会社, “1 号機原子炉格納容器 (PCV) 内部調査の結果について,” 平成 24 年 10 月 22 日.
- [3.1.2-9] S. L. Blatt, “Characteristics of random-sum peaks in nuclear radiation spectra”, Nuclear Instruments and Methods 128 (2), 277-281 (1975).

3.2 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発（再委託先：物質・材料研究機構）

3.2.1 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

高品質なダイヤモンド pin 構造を作製するために、{111}単結晶基板表面での化学気相成長（CVD）ダイヤモンド形成を行い、結晶成長品質を評価した。原子間力顕微鏡を用い、原子層ステップ観察でステップフロー成長の完全性を評価した。

(1) {111}単結晶基板表面での CVD ダイヤモンドの成長

{111}単結晶ダイヤモンド（2 mm×2 mm×0.5 mm）表面へホモエピタキシャル成長を行った。この単結晶ダイヤモンド基板は、高温高压合成法（HPHT）により作製されたものである。ダイヤモンド薄膜成長には物材機構に既存のマイクロ波プラズマ CVD 装置を用いた。図 3.2.1-1 に CVD システムの概略を示す。本装置では、リークレートを抑えることで意図しない不純物混入を押さえた高品質かつ高純度の CVD ダイヤモンドの成長が可能である。本実験に用いたエピタキシャル成長条件を表 3.2.1-1 に示す。

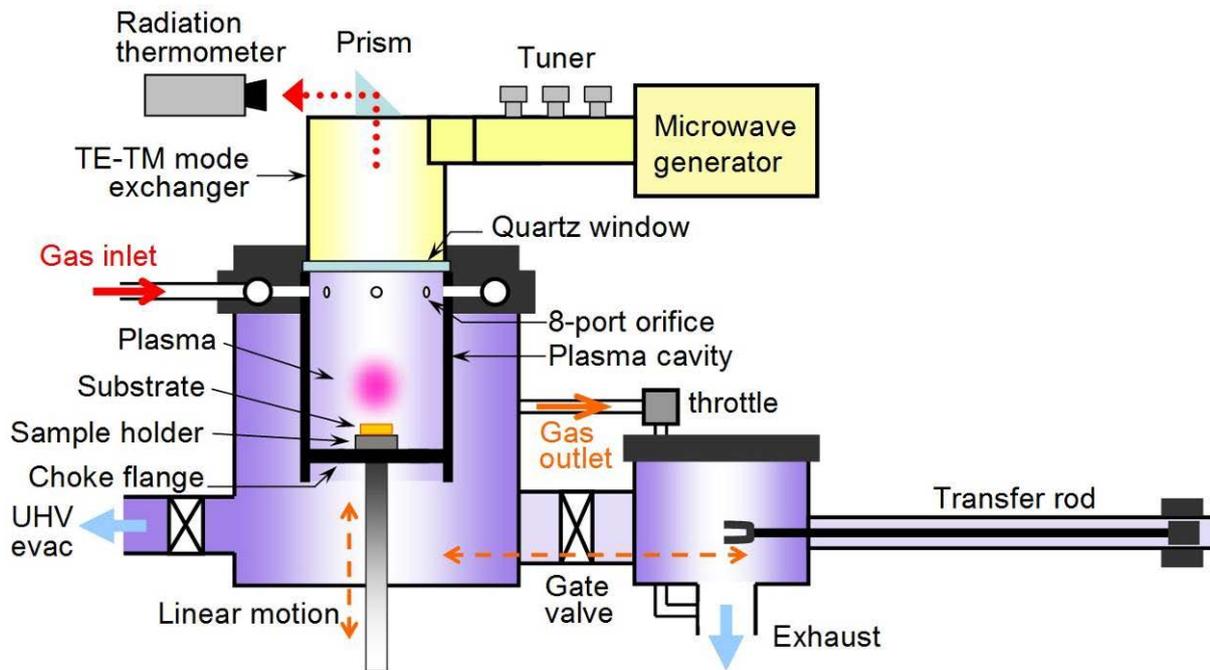


図 3.2.1-1 プラズマ CVD システムの概略図

表 3.2.1-1 ダイヤモンドのエピタキシャル成長条件

基板	{111}単結晶ダイヤモンド
メタン濃度[CH ₄]/[H ₂]	0.4 %
酸素濃度[O ₂ /H ₂]	0.05 %
反応ガス圧力	150 Torr
基板温度	800 °C
成長速度	~1 μm/h

(2) 共焦点ラマン分光による{111}単結晶基板表面でのCVDダイヤモンドの結晶品質評価

作製したホモエピタキシャルダイヤモンド層の結晶品質は、共焦点ラマン分光により評価を行った。ダイヤモンドは、ラマン活性な物質であり、天然同位体比で応力緩和している場合、1332.5 cm⁻¹ 付近にピークがあらわれる。このスペクトルの半値幅及びピークシフトから、それぞれ結晶品質及び応力状態を評価できる。使用した装置は NIMS に既存の、WITech 社製、Confocal Raman Microscope alpha 300R である。レーザー光源は、YAG : 532 nm で、測定時のレーザーパワーは、20 mW である。試料は、モーター駆動及びピエゾ式のステージに置かれるため、高速マッピング測定が可能である。本装置は、共焦点光学系を備え、光学レンズの開口数及びレーザー波長で決められた空間分解能でラマンスペクトルを得ることができる。使用した対物レンズは、開口数 0.7 の 50 倍のものである。このレンズとレーザー波長から得られる空間分解能は、xy 方向: 0.39 μm、Z 方向: 2.5 μm である。回折格子は、1800 groove/mm を使用した。

本実験では、エピタキシャル層の結晶品質をその基板と比較した。そのため、図 3.2.1-2 に示すような範囲でエピタキシャル層と基板を含むように断面マッピング測定を行った。ダイヤモンドの屈折率(2.47)を考慮したうえで、マッピング範囲を、X(表面並行)方向 100 μm、Z(深さ)方向 150 μm とした。マッピング時の測定間隔は、X 方向 0.5 μm、Z 方向 1 μm である。

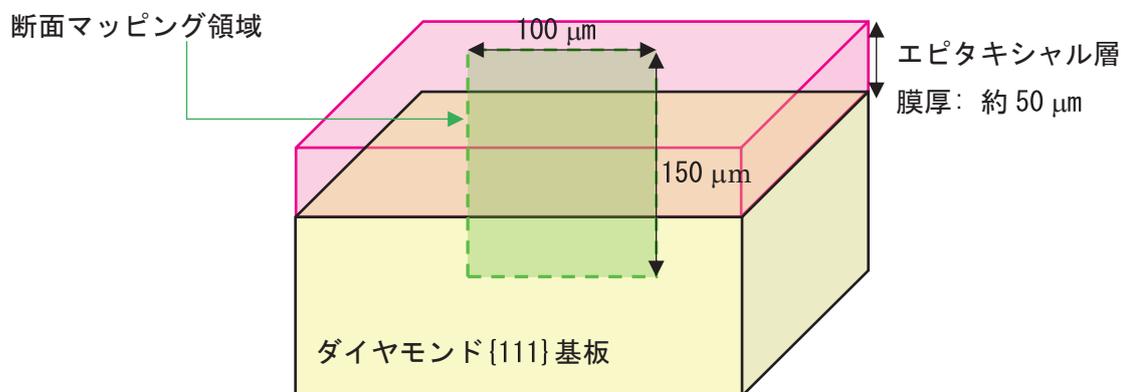


図 3.2.1-2 共焦点ラマン分光評価でのマッピング測定領域の概略

まず、本実験で得られたホモエピタキシャル層の典型的なラマンスペクトルを図 3.2.1-3 に示す。1332.55 cm^{-1} にダイヤモンドに起因するピークが観測され、半値幅は 2.36 cm^{-1} であった。ダイヤモンド中の窒素不純物に起因する蛍光(1420 cm^{-1})やグラファイト成分に起因する蛍光(1500-1580 cm^{-1})は観測されない。図 3.2.1-4 にホモエピタキシャル層及び基板のラマンスペクトルを示す。比較のため、ダイヤモンドピーク部分の領域を拡大し、強度を規格化したものを示している。基板では、1332.56 cm^{-1} にダイヤモンドに起因するピークが観測され、半値幅は 2.39 cm^{-1} であった。

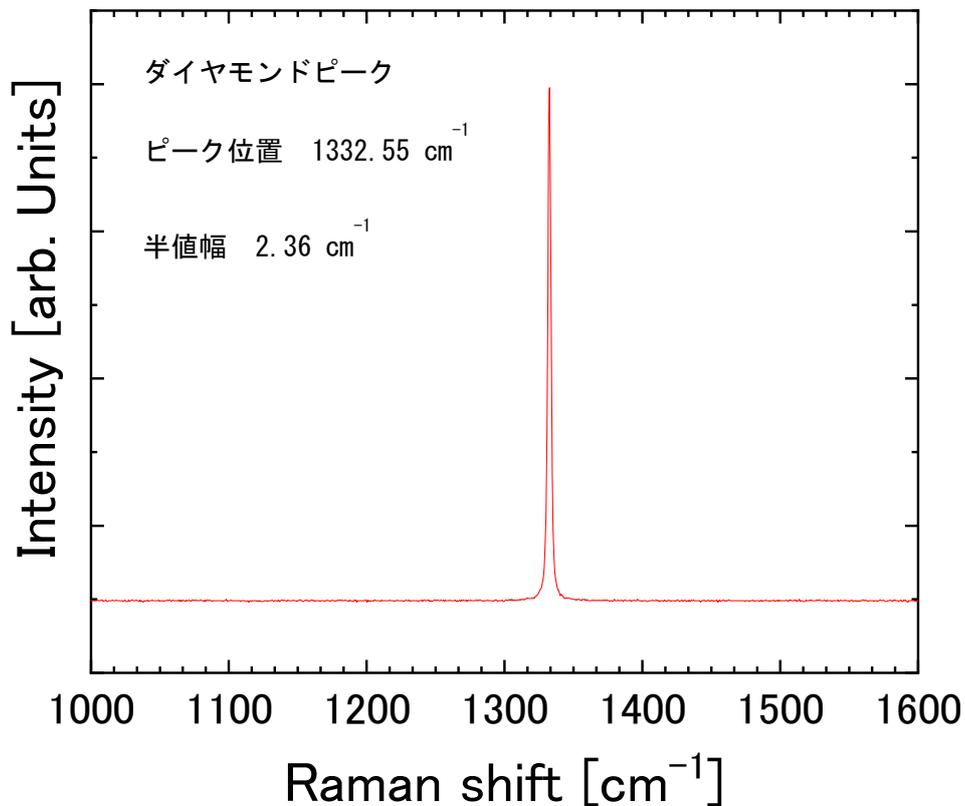


図 3.2.1-3 ホモエピタキシャル層の典型的なラマンスペクトル

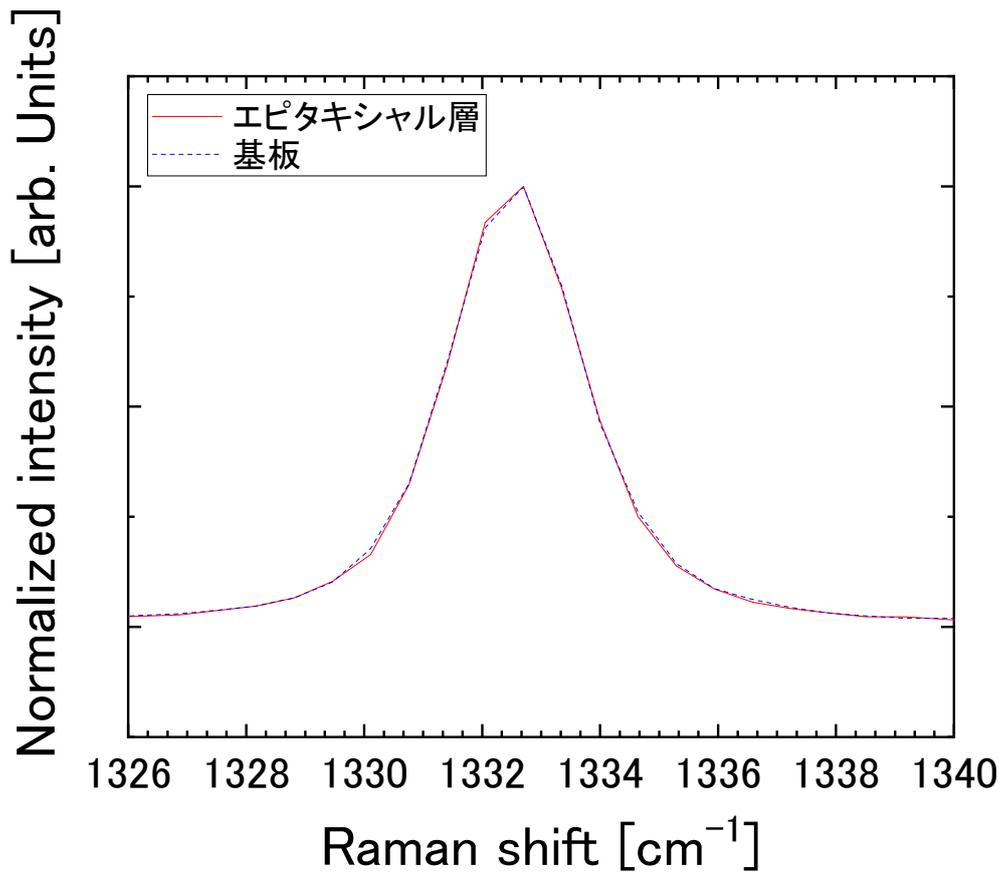


図 3.2.1-4 ホモエピタキシャル層及び基板のラマンスペクトル

上記の単一スペクトルの比較では、基板及びエピタキシャル層のスペクトルはほぼ重なっており、結晶品質は、同程度であった。より統計的にエピタキシャル層と高温高压合成基板の結晶品質を比較・評価するため、断面マッピング測定を行った。図 3.2.1-5 に試料中心部の断面ラマンマッピング像を示す。(a)及び(b)は、それぞれダイヤモンドピーク位置と半値幅である。カラースケールは、それぞれ明るいほど、高波数側にシフトまたは半値幅が大きいことを示している。ピーク位置マッピングから、エピタキシャル層中のピーク位置の分布は、比較的均一で、ほぼ歪がないエピタキシャル層が成膜できていることがわかった。また、基板界面から $50\mu\text{m}$ ほど下の領域までは、やや低波数側へのシフトが、基板界面から $100\mu\text{m}$ 下の領域では、やや高波数側へのシフトが観察される。これは基板内部、界面直下の領域とバルク内部の領域で応力状態にわずかな分布があることを示している。

ダイヤモンドピーク半値幅のマッピング(図 3.2.1-5b)からは、エピタキシャル層がやや暗めに表示されている。これは、基板に比べてエピタキシャル層でわずかに半値幅が狭くなっていることを示している。定量的に示すため、基板とエピタキシャル層それぞれの領域からダイヤモンドピーク半値幅のピクセル数をヒストグラムとして抽出したものを図 3.2.1-6 に示す。(a)及び(b)は、それぞれ基板とエピタキシャル層のヒストグラムである。ガウス分布として、ピーク位置を算出すると、基板で 2.418 cm^{-1} 、エピタキシャル層で 2.411 cm^{-1} であった。同様にこの分布の半値幅を算出すると、基板で 0.04628 cm^{-1} 、エピタキシャル層で 0.04220 cm^{-1} であった。これらのことから、エピタキシャル層の結晶品質は、統計的に算出されたラマン半値幅及びそのバラつきという観点から基板よりも高品質であることがわかった。

以上の結果から、本 CVD 装置及び成長条件を用いることで、基板の高温高压合成単結晶ダイヤモンド{111}より結晶品質が良いホモエピタキシャルダイヤモンド層を作製できることがわかった。

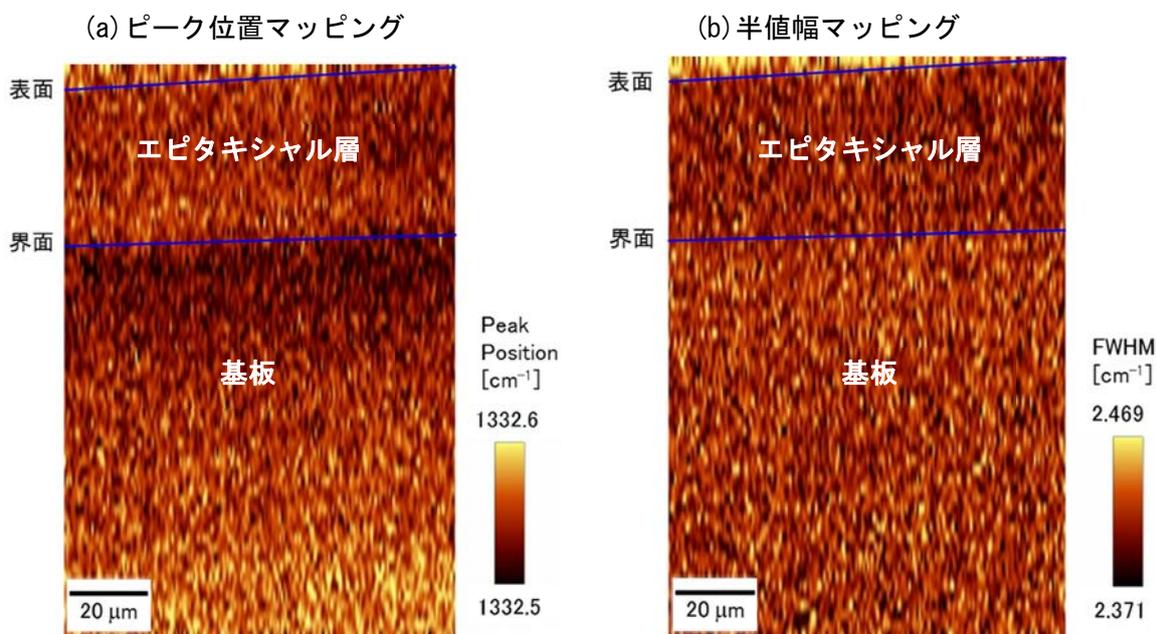


図 3.2.1-5 試料中心部の断面ラマンマッピング像

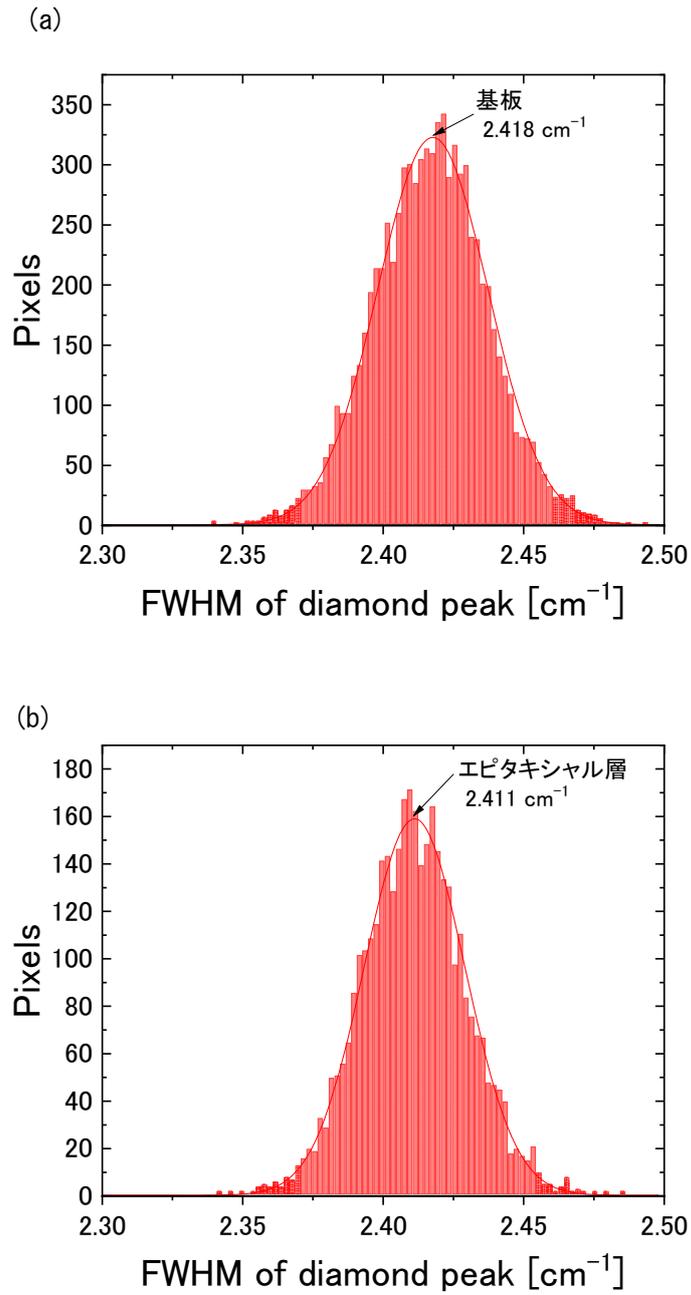


図 3.2.1-6 ラマンマッピング像から抽出したダイヤモンドピーク半値幅のヒストグラム
 (a) 基板、(b) エピタキシャル層

(3) 原子間力顕微鏡 (AFM) による原子ステップ観察

(1) で作製した試料の原子ステップ観察を行い、成長の完全性を評価した。ダイヤモンド表面の観察には本経費により導入した原子間力顕微鏡(日立ハイテクノロジー AFM5200S) を用いた。AFM 像の取得は探針を試料に接触させるコンタクトモードで行った。図 3.2.1-7 に試料の AFM 像を示す。(a) は 3 次元像である。ダイヤモンドのテラスが図中左側から右側にかけて、階段状に広がっていることがわかる。(b) には 2 次元像、(c) は (b) 内に赤色の直線で示した領域の断面プロファイルを示す。テラスの段差の変動は 1 テラス当たり 0.2 nm とダイヤモンドの原子層ステップに概ね一致した。テラス幅は約 18 nm であった。テラス幅とステップ高さから見積もった試料の {111} 面に対する傾きは 0.8 度であった。これにより本研究に用いる CVD ダイヤモンド成長実験系において、原子オーダーで平坦で高品質な結晶を作製可能なステップフロー成長が実現できていることが確認された。これは高品質な pin 接合検出器を作製するために欠かせない重要な知見である。

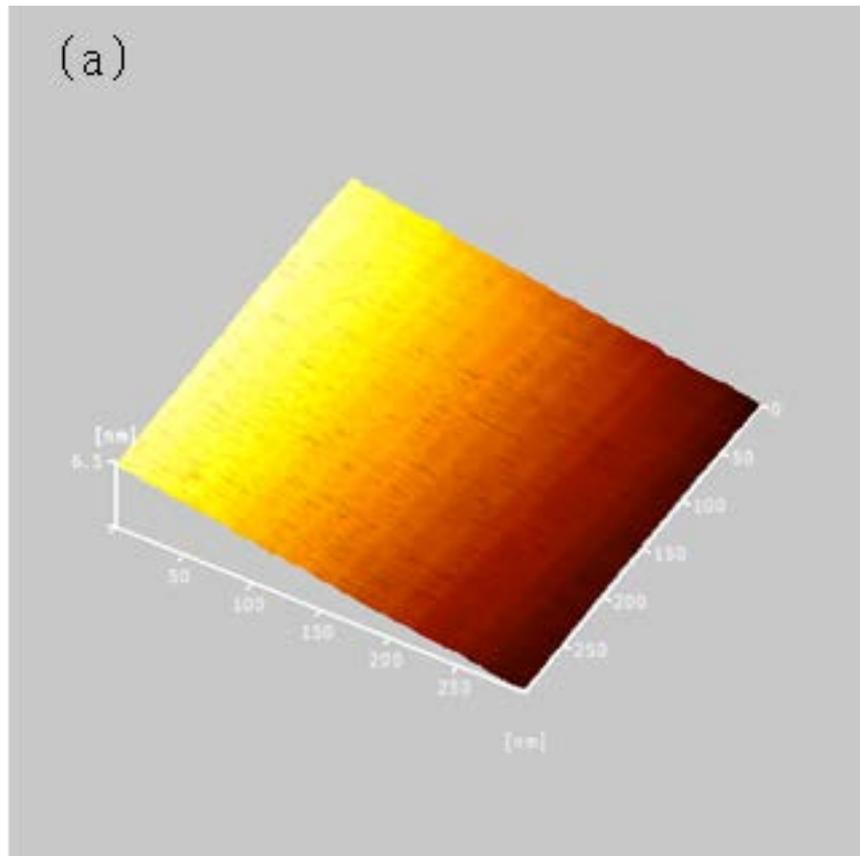


図 3.2.1-7 ダイヤモンド試料の AFM 像 (1/2)

(a) 3 次元像

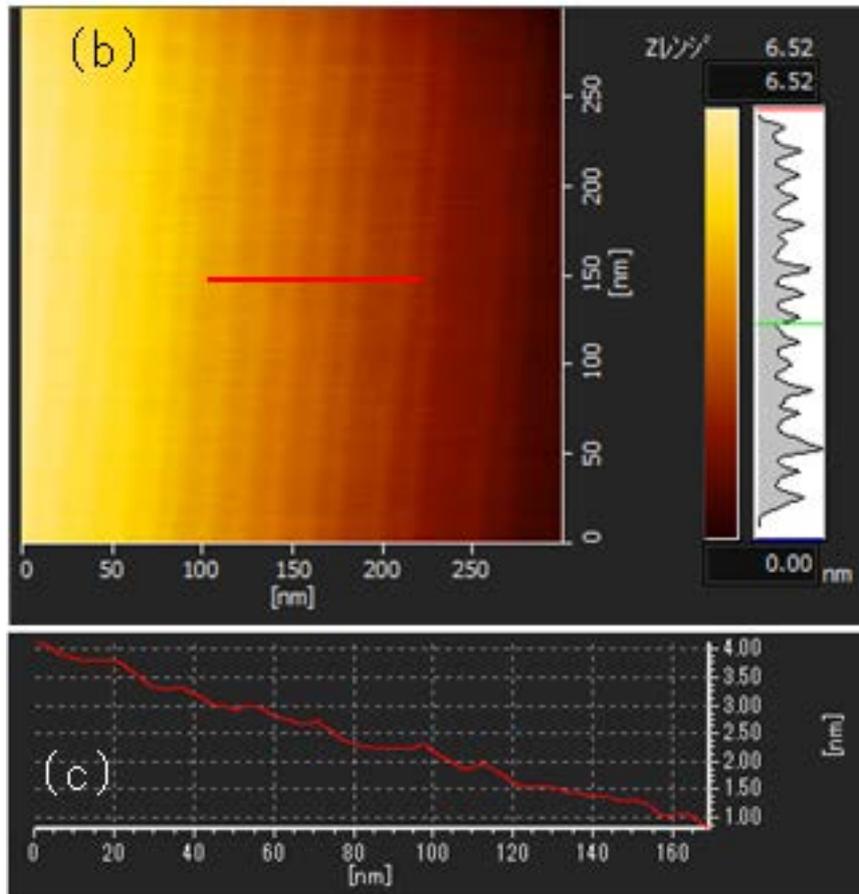


図 3.2.1-7 ダイヤモンド試料のAFM像 (2/2)
 (b) 2次元像 (c) 断面プロファイル

3.2.2 センサー形成プロセスに関する研究

センサーに用いるダイヤモンド pin 接合構造を形成するための準備として、反応性イオンエッチングによる構造加工試験を開始した。ダイヤモンド {111} 単結晶およびマスク材料に対するエッチングレートを実験的に導出した。

(1) 試料作製

図 3.2.2-1 にはエッチングによるメサ構造形成プロセスを示す。メサ構造形成プロセスは①マスク材の蒸着、②反応性イオンエッチング、③マスク材除去の 3 つの過程からなる。エッチング用のマスク材料には酸素プラズマに対して酸化膜の形成による強い耐性を持つ Al 蒸着膜を用いた。試料のエッチングには、物材機構に既存の高周波プラズマエッチング装置 (13.56 MHz) を用いた。エッチング条件を表 3.2.2-1 にまとめた。

表 3.2.2-1 エッチング条件

反応ガス	O ₂
反応ガス圧力	5 Pa
出力	50 W
マスク材料	Al
エッチング時間	0.5 h

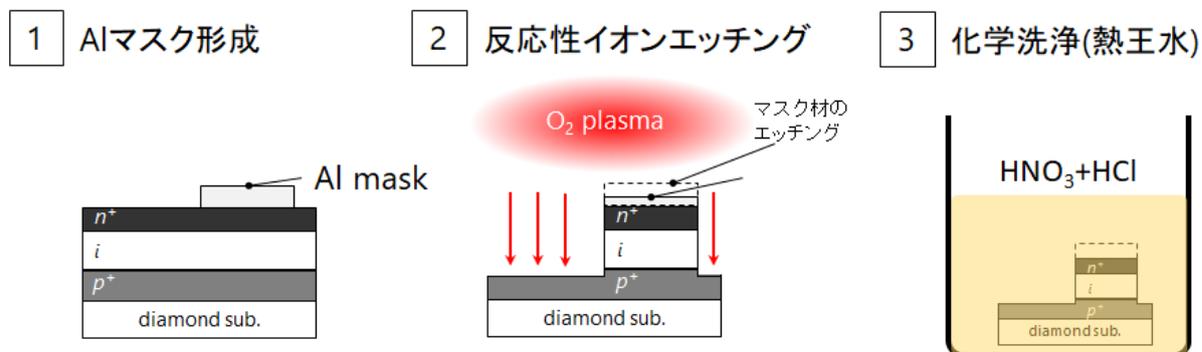


図 3.2.2-1 メサ構造形成プロセス

図 3.2.2-2 には試料の光顕像を示す。(a)がエッチング前、(b)がエッチング後である。試料の端面に近傍で観察された強いコントラストは試料の荒れを反映している。高周波プラズマに対して試料表面に形成されるセルフバイアス電圧が試料端面のエッジで電界集中を生じ、試料中央部と比較してエッチングが進行したものと考えられる。

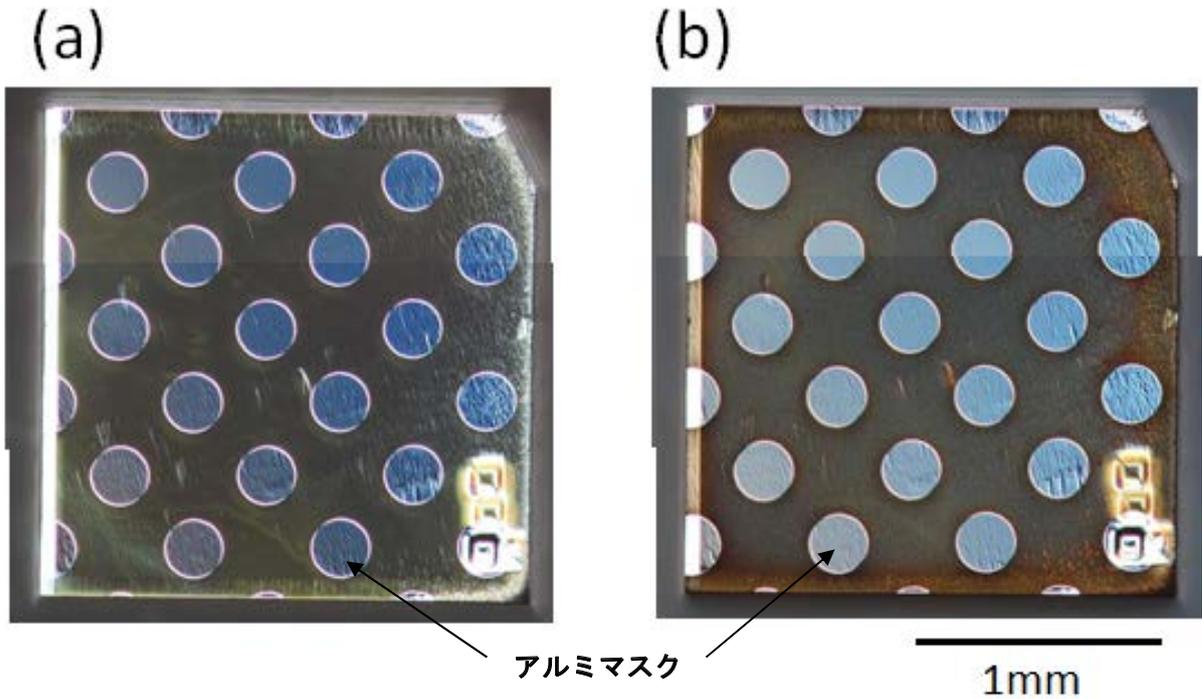


図 3.2.2-2 Al マスクを蒸着したダイヤモンド試料
(a)RIE エッチング前 (b)RIE エッチング後

(2) エッチングレート評価法

共焦点レーザー顕微鏡 (KEYENCE VK8500) により Al マスクの厚みとエッチングされたダイヤモンドメサ(丘)の深さを計測した。①反応性イオンエッチング前、②エッチング後、③マスク材除去後の 3 度、測定をし、各ステップで得られた値の差分から Al マスクとダイヤモンドのエッチングレートを導出した。

図 3.2.2-3 には各ステップで得られた Al マスクとメサのプロファイルを示す。得られた値を表 3.2.2-2 にまとめた。Al マスクのエッチングレートは $0.1 \mu\text{m}/\text{h}$ 、ダイヤモンドは $1.3 \mu\text{m}/\text{h}$ であった。ここから見積もった Al マスクとダイヤモンドのエッチング選択比は 13 であった。

表 3.2.2-2 マスク材とダイヤモンドのエッチングレート

Al マスク	$0.1 \mu\text{m}/\text{h}$
ダイヤモンド	$1.3 \mu\text{m}/\text{h}$
選択比	13

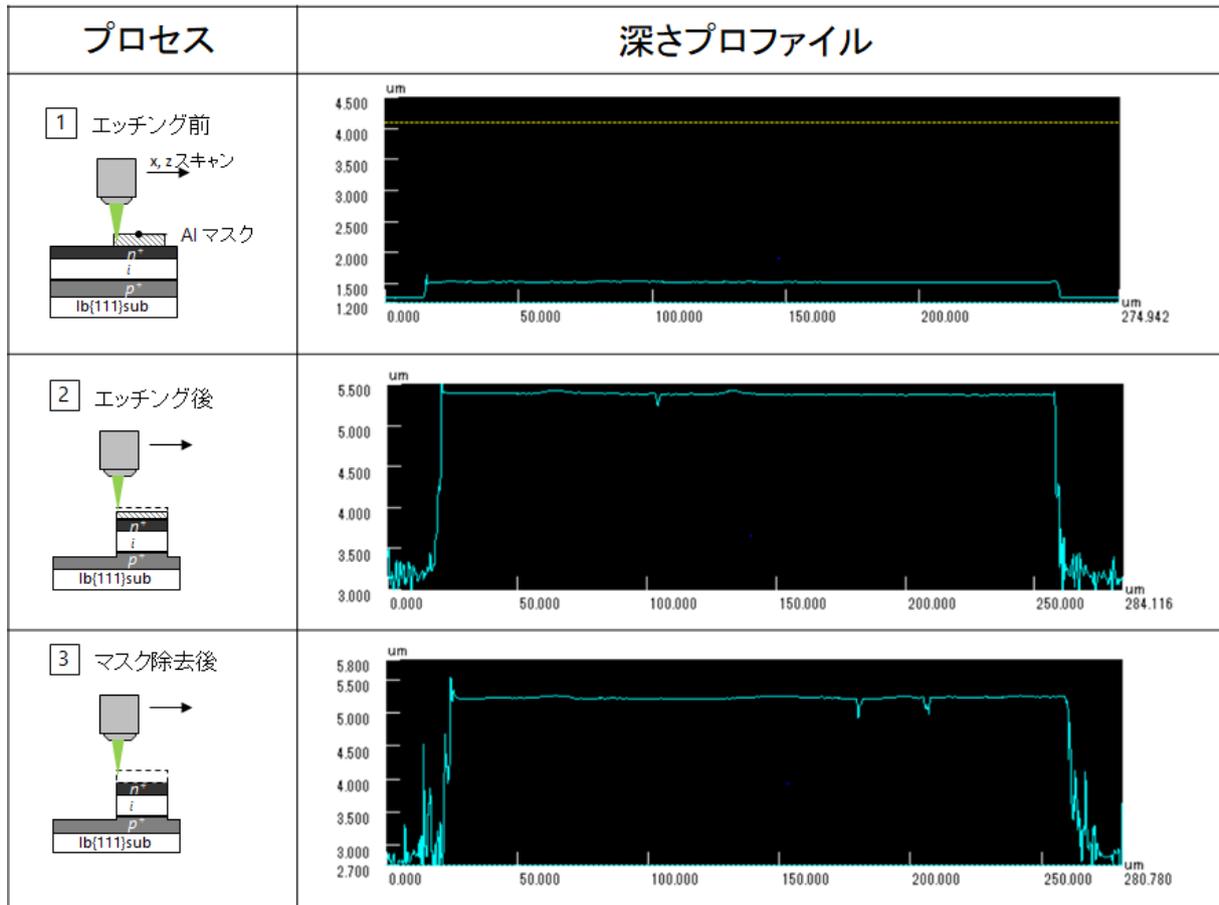


図 3.2.2-3 エッチング速度評価プロセスと深さプロファイル

(3) 電気特性評価

放射線センサーとしての評価に先駆け、(1)で示したプロセスを用いて、形成した pin 接合素子の I - V 特性を評価した。電気特性の評価には真空プローバ (図 3.2.2-4) およびアジレント・テクノロジー社製パワーデバイスアナライザ B1505A を用いた。評価は真空中 (1×10^{-10} Torr)、室温で行った。得られた I - V 曲線の 1 例を図 3.2.2-5 に示す。順方向特性では 4.5 V 付近から順方向電流の立ち上がりが観察され、ダイヤモンドの pn 接合による障壁高さに概ね一致した。整流比は ± 10 V で 10 桁が得られた。逆方向特性では評価装置の上限である 100 V 印可時に漏れ電流は 10 pA 以下と非常に低く抑えられた。

ダイヤモンド放射線検出器の多くは 0.1 - 1 V/ μm 程度の電界強度で動作している。本試料の i 層の厚さは約 $1 \mu\text{m}$ である。今回得られた、内蔵電位と数 μm 厚の有感層厚さから見積もられる電界強度は上記の要件を満たしており、空乏層におけるキャリア寿命や移動度が十分高ければ、内蔵電位を利用して放射線検出をすることが期待できる。

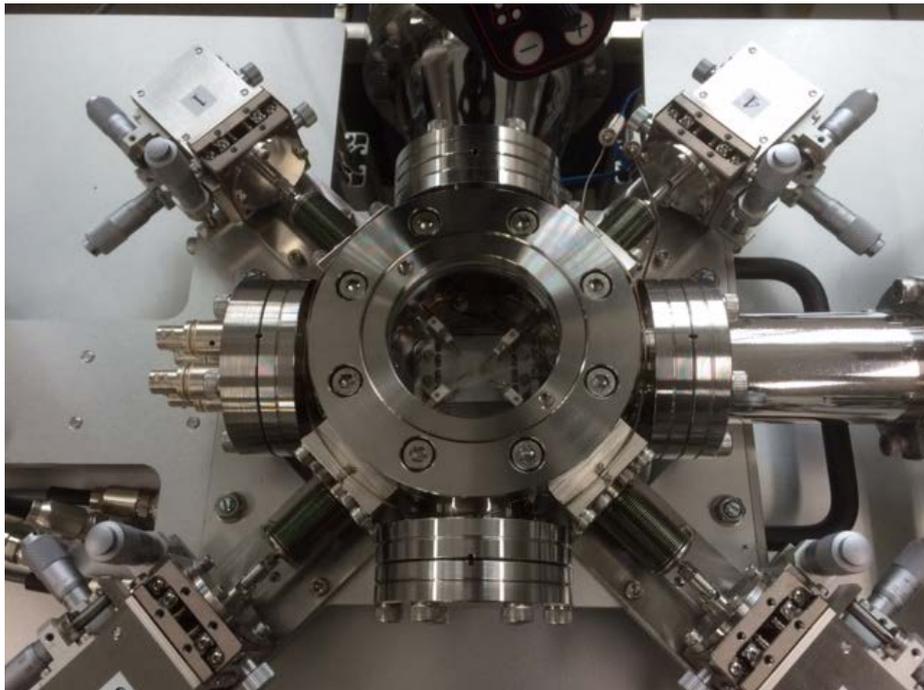


図 3.2.2-4 電気特性評価用超高真空プローバ

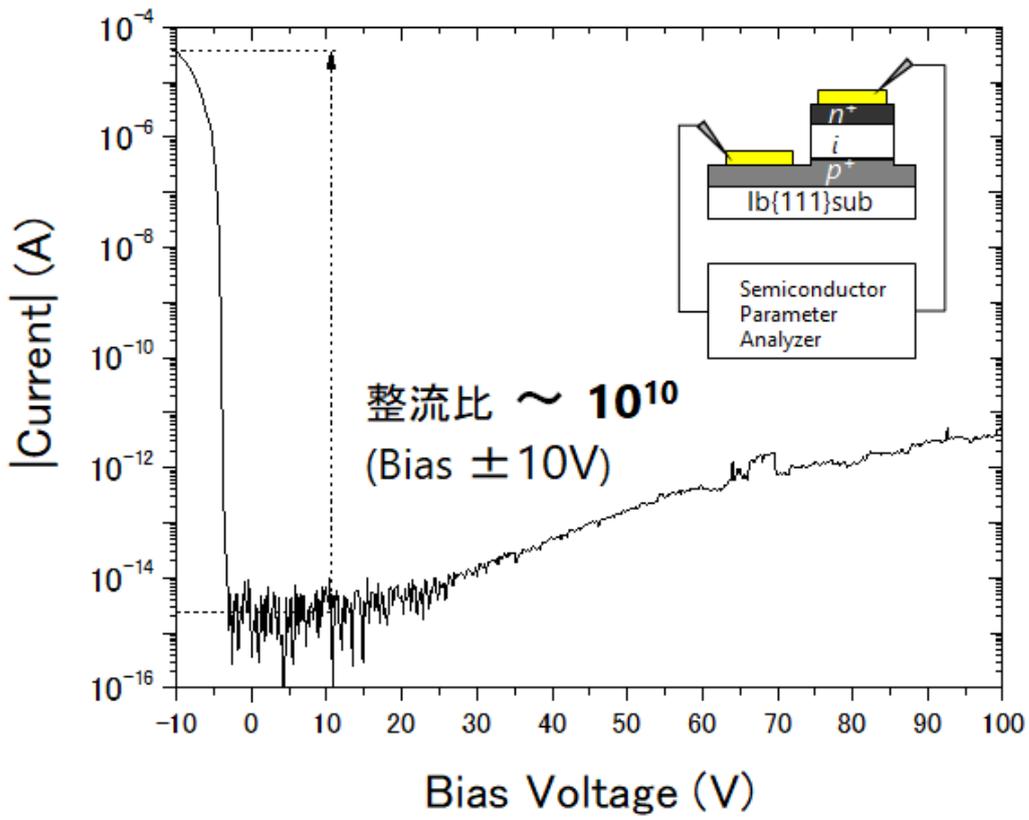


図 3.2.2-5 pin ダイオードの I - V 特性

3.2.3 中性子検出用センサー構造に関する研究

中性子コンバータ膜の材料として有効性が期待されるフッ化リチウム (LiF)、窒化ホウ素 (BN) のダイヤモンドセンサーに対する適性を検討するとともに、モンテカルロシミュレーションを用いて、放出される荷電粒子によるエネルギー付与から中性子コンバータの厚み、ダイヤモンド pin ダイオードの有感層厚さ指針値を決定した。

(1) 中性子コンバータ膜の選定

中性子は電荷をもたないため、半導体検出器での放射線検出においては一般にリチウムやホウ素を含む中性子コンバータ膜を用いる。中性子を荷電粒子に変換し、半導体検出器の空乏層で荷電粒子を検出する。リチウム、ホウ素は熱中性子とそれぞれ ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 、 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応を持つ。放出核のエネルギーはそれぞれリチウムが $E_\alpha = 2.05 \text{ MeV}$ 、 $E_t = 2.73 \text{ MeV}$ 、ホウ素が $E_\alpha = 1.47 \text{ MeV}$ 、 $E_{\text{Li}} = 0.84 \text{ MeV}$ である。今回、中性子コンバータ膜としては NIMS で超高品質な単結晶合成が可能な六方晶 BN (hBN) を優先的に用いる事とした。高品質な単結晶であるが故に精密なシミュレーションが可能であること、放出核の飛程が短いためダイヤモンド検出器の感受層の厚さを小さく設計可能であり、最終的にセンサーに用いた場合 γ 線感度を低減可能であることがその理由である。

(2) モンテカルロシミュレーションによる中性子コンバータ、センサー有感層厚さの見積もり

中性子コンバータで変換された荷電粒子は半導体放射線検出器の空乏層に到達するまでに、中性子コンバータ内部でエネルギーを損失する。空乏層に入射される放出核のエネルギー分布は核反応の Q 値で求まるエネルギーを最大とし、低エネルギー側にすそ野を引いた形となる。

検出器の中性子感度は中性子コンバータ膜厚が飛程よりも小さい場合、その膜厚に比例して増加する。膜厚が放出核の飛程よりも大きい場合は、ダイヤモンド-中性子コンバータの界面から飛程以上に距離が離れた中性子コンバータの容積は放射線検出に寄与できない。これはセンサー有感層に到達する前に中性子コンバータ内部で放出核の全エネルギーが吸収されてしまうためである。したがって、中性子の検出感度を最大にするために必要な中性子コンバータの膜厚は放出核の飛程とほぼ等しい。

同様に、ダイヤモンドセンサーの有感層厚さも放出核の飛程、すなわち、全エネルギーを付与できる膜厚よりも大きくしても、検出感度増加に寄与できない。さらに γ 線感度を増加させてしまうため、検出の観点からは飛程程度にするのが望ましい。

そこで、 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応で放出される核種の最大エネルギーである①1.47 MeV α 粒子、②0.84 MeV Li イオンが BN 中性子コンバータ、ダイヤモンド内でのそれぞれの荷電粒子に対する深さ方向に対するエネルギー付与をモンテカルロシミュレーションで見積もり、荷電粒子が全エネルギーを付与するのに必要な膜厚を求めた。

図 3.2.3-1 は BN 中での吸収線量の深さ方向依存性を示す。(a)が 1.47 MeV α 粒子、(b)が 0.84 MeV Li である。BN 内で荷電粒子がエネルギーを付与するのに必要な膜厚は 1.47 MeV α 線が 4.7 μm 、0.84 MeV Li イオンが 1.9 μm であった。図 3.2.3-2 にはダイヤモンド中での吸収線量の深さ方向依存性を示す。同様 1.47 MeV α 線が 3.0 μm 、0.84 MeV Li イオンが 1.3 μm であった。この結果から、センサーに利用したときに最終的に中性子の検出感度を最大にする中性子コ

ンバータの膜厚は約 5 μm 、ダイヤモンド pin ダイオードが放出核の全エネルギーを吸収し、 γ 線感度を最小にする有感層厚さは約 3 μm と見積もられた。

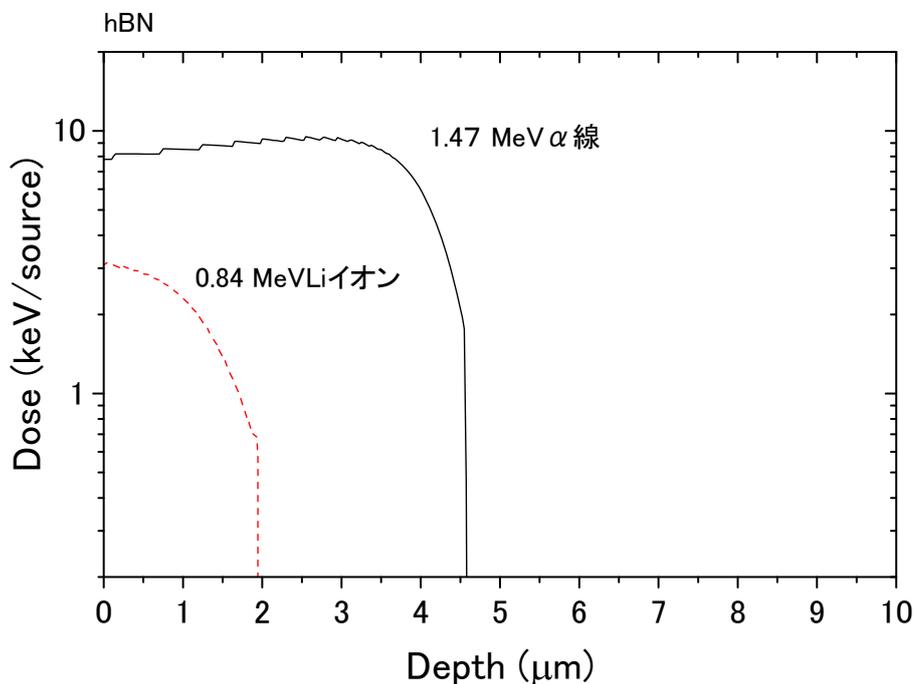


図 3. 2. 3-1 放出核による hBN に対するエネルギー付与の深さ方向依存性

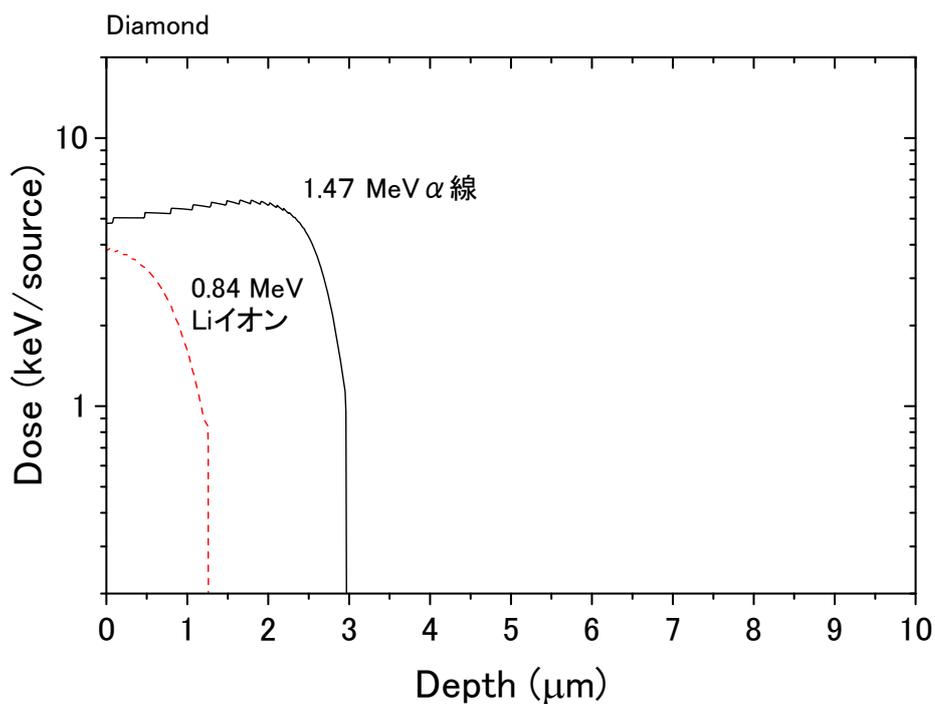


図 3. 2. 3-2 放出核によるダイヤモンドに対するエネルギー付与の深さ方向依存性

3.3 複合型センサーを搭載した水中ロボットによる遠隔計測技術の開発（再委託先：海上技術安全研究所）

3.3.1 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発

(1) SBP を用いた堆積物識別

① SBP の動作原理および構成

SBP (Sub Bottom Profiler) は音響探査の一種で、航走する調査船から周波数 1 kHz から 20 kHz 程度の音波を発信し、海底および海底下からの反射音との時間差と音圧の違いを利用して地質断面イメージを連続的に得るシステム（図 3.3.1-1, 図 3.3.1-2[3.3.1-1]）であり、海底表面付近における砂泥等の堆積作用や埋設物探査及び断層活動等の把握に使用されている。

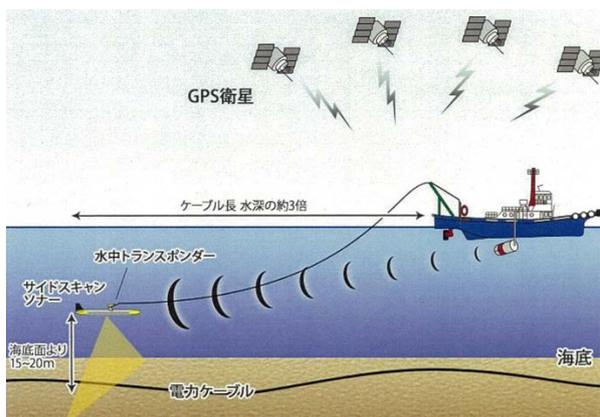


図 3.3.1-1 SBP を用いた海底探査状況の例

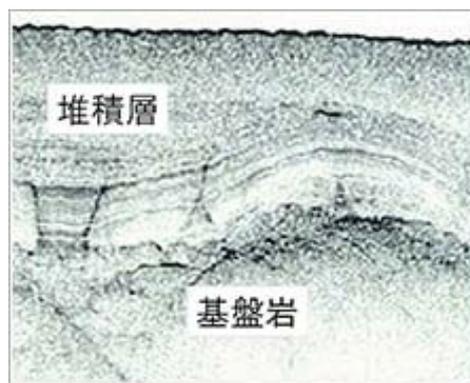


図 3.3.1-2 底質探査例

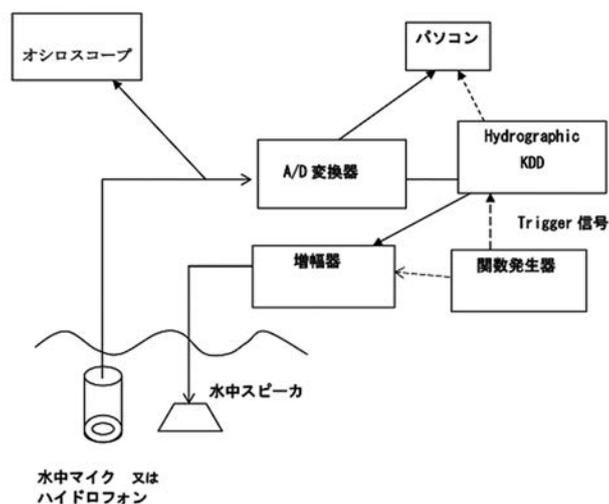


図 3.3.1-3 SBP システム構成

本研究で用いた SBP の機器構成は図 3.3.1-3 に示すように水中スピーカから音波を対象物に向けて発信させ、対象物からの反射波をハイドロフォンで受信して、スピーカの発信時刻と反射波の到達時間から深度を導出し、深度と音圧との関係を図示する。水中スピーカから発振した音波は図 3.3.1-4 に示すように、①直接ハイドロフォンに到達する経路、②水面を經由してハイドロフォンに到達する経路、③水槽の下に設置された媒質で反射して到達する経路を通過すること

が予想される。図 3.3.1-5 に水中スピーカの発振電圧波形（図中ピンク色の実線）、ハイドロフォンの受信電圧波形（水色の実線）をオシロスコープで観測した様子を示すように、SBP では音源から発振した時刻と、媒質が変化する場所で反射した音波がハイドロフォンに到達するまでの時刻の差から、ハイドロフォンを原点とする深度を求める。さらに、その到達した波の音圧つまり反射強度を併せて描画することで媒質の違いの分布を表すことで底質断層図を表現する。媒質の反射と透過のしやすさは、媒質の固有音響インピーダンスを使用して解釈する。音波が異なる媒質に入射すると、境界面で媒質の固有音響インピーダンスの違いから入射音波の一部が反射し、残りが透過する。媒質 1 から 2 へ入射する場合に、音の強さの反射率 RI、透過率 TI および透過損失 TL は以下のように表せる。

$$RI = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.3.1 - 1)$$

$$TI = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.3.1 - 2)$$

$$TL = -10\log_{10}TI \quad (3.3.1 - 3)$$

なお、 Z_1 、 Z_2 はそれぞれ媒質 1、2 の固有音響インピーダンスである。

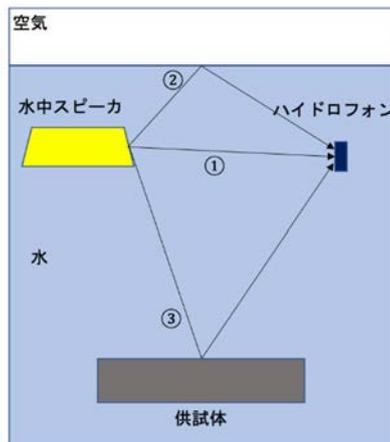


図 3.3.1-4 ハイドロフォンに入射する過程

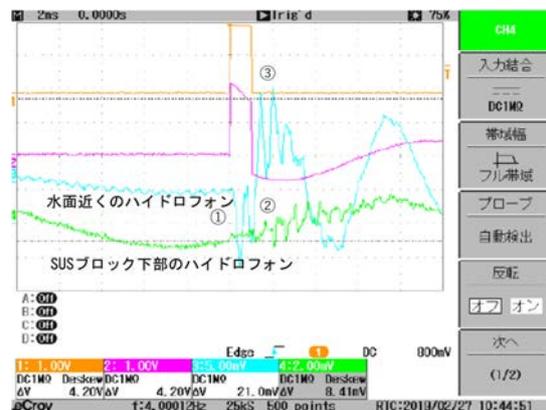


図 3.3.1-5 ハイドロフォンの出力波形

② 基礎動作試験

海上技術安全研究所（以下、NMRI）所有の小型水槽を用いて、SBP システムの基礎動作試験を以下の方法で実施した。

1) 試験方法

図 3.3.1-6 及び図 3.3.1-7 に示すように、約 1 m 四方、深さ約 1.5 m の水槽を用い、水深は 1 m に設定した。水中スピーカを水面下に置き、供試体の下側にハイドロフォンを付けた木枠を置いた。

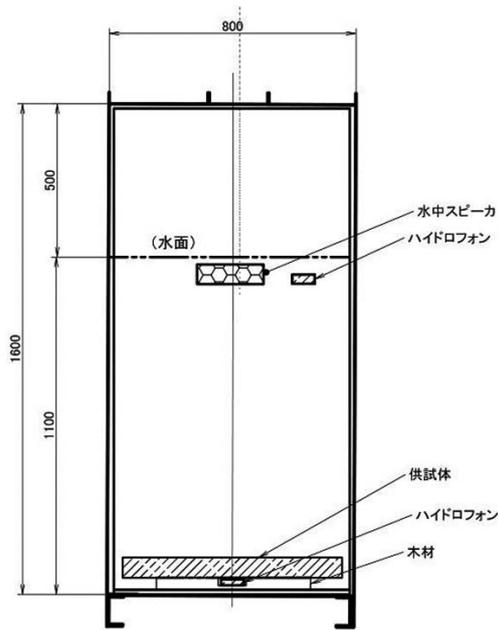


図 3.3.1-6 試験水槽形状と測定系



図 3.3.1-7 小型水槽中の砂利とスピーカ

供試体には、砂礫層の模擬としてコンクリート製レンガ（図 3.3.1-8 左）と砂利（図 3.3.1-8 中央）、燃料デブリの模擬としてステンレスブロック（密度 7.9 g/cm^3 ；図 3.3.1-8 右）を用いた。砂礫層として用いた砂利はステンレスパンに入れた状態で 2 箱（底板厚さ合計 2 mm）を重ねた状態（図 3.3.1-8）とし、これをステンレスブロック上に載せて使用した。それぞれの砂利層の厚さは 8.5 cm と 7.0 cm であり 2 箱分合計 15.5 cm である。砂利の比重は 1.86 g/cm^3 であり、かさ密度は 1.53 g/cm^3 、平均粒径は、6.8 mm である。前記第①項の試験で用いた機器類のほか、ハイドロフォンの出力をデジタル化し、発信時刻と反射音波の到達時間差から深度値を導出し、深度と音圧との関係を図示化するソフト“SonarWiz7(Chesapeake Technology, USA)”（以下 SonarWiz）を利用した。このソフトでは PC に表示された断層図を観察するとともに、オシロスコープを用いてハイドロフォンで受信した波形を観察した。ソフトで得られた断層図では、音波が異なる媒質に入射した場合、反射強度が強い媒質を比較的白い点で描画し、反射強度が弱い（透過しやすい）媒質を黒い点として描画する。この媒質の反射率と透過率は、前項で示したように媒質の固有音響インピーダンスから定義する。



図 3.3.1-8 供試体：コンクリート製レンガ（左）、砂利（中）、ステンレスブロック（右）

③ 試験結果

得られた断層図を図 3.3.1-9～図 3.3.1-11 に示す。図 3.3.1-9 は砂利（下部にステンレスブロック）の場合、図 3.3.1-10 はコンクリートレンガ、図 3.3.1-11 はステンレスブロックのみの場合である。

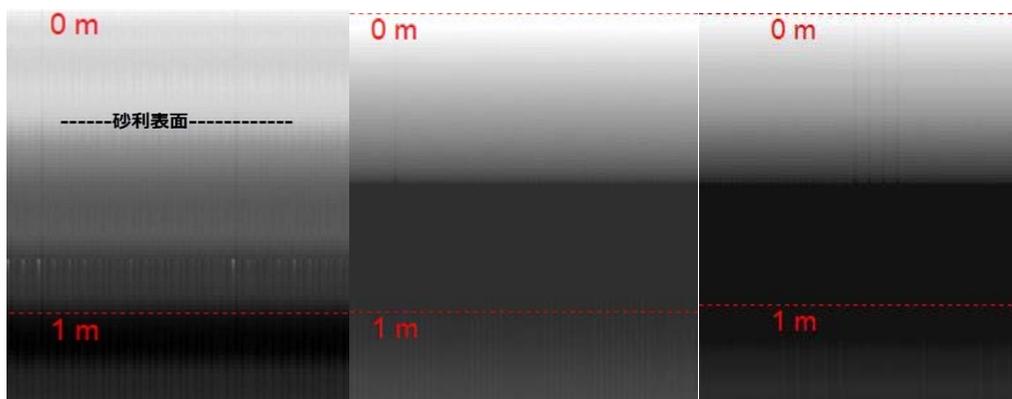


図 3.3.1-9 断層図
(砂利)

図 3.3.1-10 断層図
(コンクリートレンガ)

図 3.3.1-11 断層図
(ステンレスブロック)

砂利の場合は薄い縞模様が見られるので砂利の層とその下のステンレスの層を表示していると判断できる。なお図中の深さ表示は SonarWiz が水中の音速から自動的に計算したものである。一方、コンクリートレンガ及びステンレス単体については単純な白黒縞の 2 層のみである。これはほとんどの音波が反射されていると推定される。音響インピーダンスの高い物体であれば SBP によって明確に把握できる。コンクリートレンガ（密度：2.0～2.4 g/cm³ と推定）とステンレスブロック（密度：7.9 g/cm³）といった高密度物質相互の識別は現時点で難しい。水槽の中にステンレスブロック、コンクリートブロック等を置いた場合について、音の反射率、透過損失を求めた。この結果、ステンレスブロックを水中に置いた場合は約 90%、コンクリートブロックの場合は、約 60%反射することがわかった。砂礫層の固有音響インピーダンスを密度と SonarWiz の画像出力より概算した。また、音の透過損失については基礎動作試験のステンレスブロックの結果から、オシロスコープの波形（振幅）から求めたが、式 3.3.3-3 を用いた結果に比較的近い値となった。得られた音の反射率、透過損失、砂礫層の音響インピーダンスについては、表 3.3.1-1 に示す。

表 3.3.1-1 得られた反射率、透過率、砂礫層の音響インピーダンス

媒質	密度 (kg/m ³)	音速(縦波) (m/s)	音響 インピーダンス x10 ⁶ (Ns/m ³)	水 → 媒質 に入射する 場合音の反射率	水 → 媒質 に入射 する場合 音の強さの透過率	水 → 媒質 に入射 する場合 音の強さの透過損失
水	1000	1450	1.45			
コンクリート1	2400	4750	11.4	0.77	0.40	3.97
コンクリート2(東電)	2449	3414	8.36	0.70	0.50	2.97
ステンレス鋼(347)	7910	5790	45.8	0.94	0.12	9.24
燃料デブリ	7700	5825	14.3	0.82	0.33	4.76
砂礫層 ^{1),2)}	1770	1970	3.49	0.41	0.83	0.81
1) 砂利の密度 1.86 g/cm ³ とかさ密度 0.822 g/cm ³ より、水の体積率を求めて、砂礫層の密度を求めた。				砂礫層→ステンレスに 入射する場合の反射率	砂礫層→ステンレスに 入射する場合の音の 強さの透過率	砂礫層→ステンレスに 入射する場合の音の 強さの透過損失
2) SonarWizの画像出力における砂礫層の厚さ 11.4cmを求め、砂礫層の音速/水中の音				0.86	0.26	5.80

④評価・検討

SonarWiz の画像出力において、水とステンレスブロックやコンクリートブロック表面で、白黒の境界線が明確に分かれていることが確認できた。さらに砂礫層の場合は明確な境界線は生じていないが、砂礫層の固有音響インピーダンスがステンレスブロックやコンクリートブロックに比べて低いことが推測できる。また今回の実験条件で砂利とブロック状供試体の選別は確認できたが、コンクリートブロックとステンレスブロックの識別はできなかった。設定した周波数 1 kHz では、コンクリートブロックとステンレスブロックの両供試体表面での反射が支配的だったことが原因である。そのため、最適な周波数帯を今後の試験で探索することにした。また、実験中のノイズとして、50 Hz の周波数を持ったノイズが存在し、ハイドロフォン信号が 50 Hz のノイズに波形重畳した形で観測された。ノイズについては今後、50 Hz のノイズをフィルタリングする事、ハイドロフォン出力を増幅することで対応する。

以上より、PCV 内に堆積している砂礫層はステンレスやコンクリートの固有音響インピーダンスに比べて低いと予想されるため、水との境界面において、ステンレスやコンクリートに比べて音波は反射しないものと考えられる。また、米国 TMI 事故より引用した燃料デブリの固有音響インピーダンス[3.3.1-2]はステンレスに近い値[3.3.1-3]となっており、1F の燃料デブリも似たような値であると仮定すると、堆積層中あるいは、底に燃デブリ層が存在した場合、堆積層と燃料デブリの境界は SonarWiz の画像出力において白黒のコントラストが現われると予想され堆積層と燃料デブリの識別は可能であることを示している。

(2) 音響探査システム構成デバイスの小型化検討

①水中スピーカ

SBP の音源は、次に示す機能を満足する必要がある。

- ・大出力
- ・周波数制御が容易で、目的により適切な周波数選択が出来る
- ・単純な波形
- ・装置が小型で、操作が簡単
- ・発振が安定で再現性がある

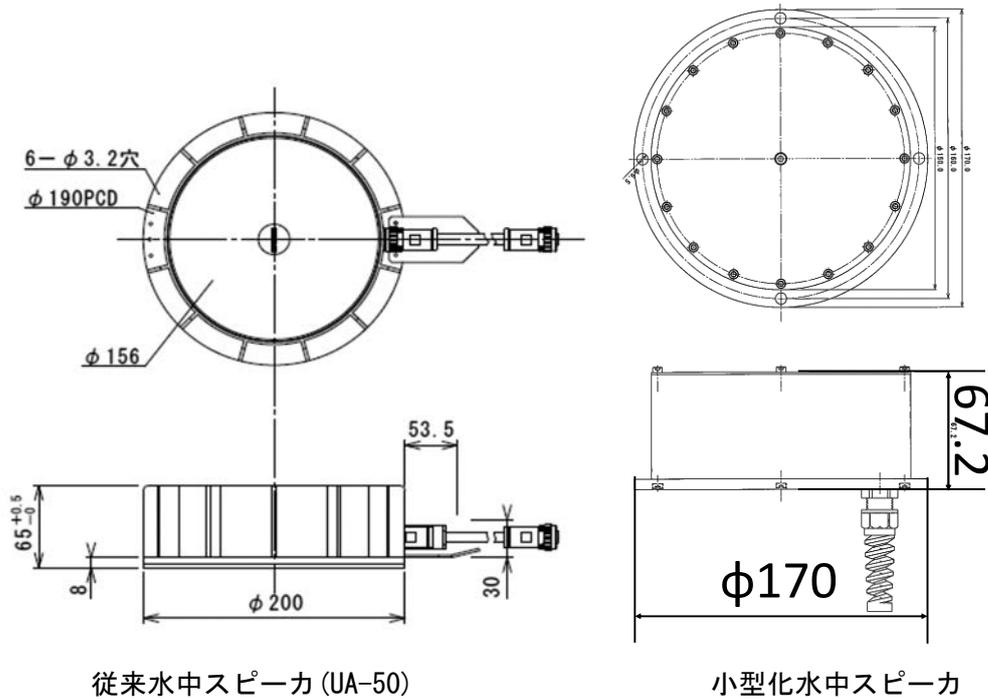
以上の観点から、水中作業員への連絡やアーティスティック・スイミングの練習などに使用する水中仕様の高出力の水中スピーカを音源とした。

SBP の基礎試験において、市販（ウエタックス社製 UA-50）の製品を使用した。ROV に搭載するには、形状や重量を小型・軽量化を計る必要がある。

しかし、高出力の音波を発生するためにはスピーカの振動板形状、特に直径を広くする必要があり、また耐放射線性を考慮すると振動板の材質も樹脂系やゴム系等の弾性材を避けて、アルミ等の金属材を使用する必要があることがわかった。これらの検討から、30 mm の直径縮小ならびに 0.5 kg の重量軽減を実現した。また、再生最大周波数も市販の製品の 10 kHz から 20 kHz まで拡張させることができた。この小型化の検討を行った水中スピーカと従来の製品の性能の比較を、表 3.3.1-2 に示した。また、図 3.3.1-12 に従来製品と新型スピーカの外観図を示した。

表 3.3.1-2 従来製品と小型化スピーカの比較

仕様	UA-50	小型化スピーカ
外形寸法 [mm]	Φ200×65	Φ170×67
質量 [kg]	4.5	4.0
使用環境	温水・海水	温水・海水
再生周波数帯域 [Hz]	50 - 10 ³	70 - 2 × 10 ³
インピーダンス [Ω]	4.0	4.0
最大入力 [W]	60	50
最大深度 [m]	10	10



従来水中スピーカ (UA-50) 小型化水中スピーカ
 図 3.3.1-12 従来水中スピーカ (左) と小型化水中スピーカ (右) の外観

②ソナー

ソナーは海洋における海底探査で広く使用されているが、原子炉格納容器 (PCV) のように海洋に比べて非常に狭い空間の使用では多重反射によるノイズの問題がある。また、ROV に搭載するために小型化が望まれるため検討してきた。その結果、海技研所有の深海探査用ソナー (IMAGENEX 社製 DT-100 型 ; 以下、DT-100) は形状や重量の点で ROV 用としては不向きである。そこで、市販で汎用品である魚群探知機用ソナーの中でもマルチフェイズド・アレイ方式のソナー (Garmin 社製ソナー ; PS-31) は三次元画像を構成でき、堅牢で、比較的購入し易いような価格設定となっている。従って、高放射線下での使用では、音波素子の交換頻度が高くなる可能性があるが経済的である。図 3.3.1-13 に現有ソナーDT-100、図 3.3.1-14 に Garmin 社製ソナーPS-31 の外観を示し、表 3.3.1-3 に 2 種のソナー仕様の比較表を示した。



図 3.3.1-13 現有ソナーDT-100



図 3.3.1-14 Garmin 社製ソナー PS-31

表 3.2.1-3 ソナー仕様比較

デバイス名	DT-100 マルチビームソナー	PS-31 マルチビームソナー
長さ [mm]	170	170
幅または直径 [mm]	92	42
厚さ [mm]	117	91
乾燥重量 [kg]	8	0.8
最大探査深度 [m]	100	91
発振周波数 [kHz]	240	417

③小型化水中スピーカの特性試験

図 3.3.1-15 に示す試験用プールにおいて表 3.3.1-4 に記載した試験装置を用いた。試験用プール内の小型化水中スピーカとハイドロフォンの配置を図 3.3.1-16 に示す。



図 3.3.1-15 スピーカ試験用水槽

表 3.3.1-4 特性試験に使用した装置類

装置	機能	機種/製造メーカー
発振器	音波の周波数発振用	AFG-2105/GWINSTEK製
アンプ	信号増幅用	GW-D1400 II/PIONEER製
ハイドロフォン	受波測定用	OST2100/オキシーテック製
FFTアナライザ	信号レベル測定用	IN USB6251/NATIONAL INSTRUMENTS 製

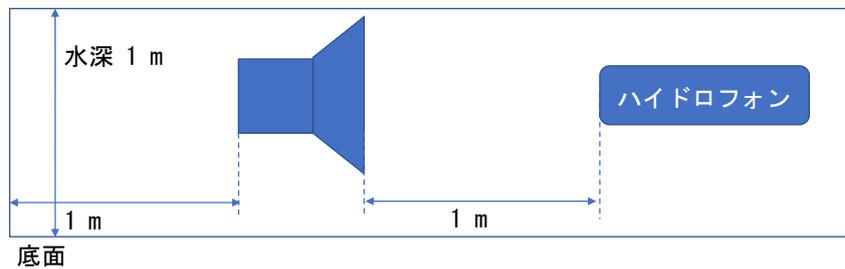


図 3.3.1-16 特性試験に使用した装置と水槽での配置概要

試験では、小型化水中スピーカの発振周波数を変化させ、ハイドロフォンで音圧を測定し小型化水中スピーカから発生する音波の周波数スペクトルを FFT アナライザで調べた。FFT 解析による周波数スペクトルの例を図 3.3.1-17 から図 3.3.1-19 に示す。

得られた周波数スペクトルから、小型化水中スピーカが期待通りのスペックを示すことが分かった。なお、これらの基調周波数が 1 kHz 以上の周波数スペクトルにおいては、従来の水中スピーカと同様に基調周波数の他にフーリエ級数展開次数に相当する高調波が観測されているが、SBP の音源として使用する上では、ほとんど影響はないと考えられる。

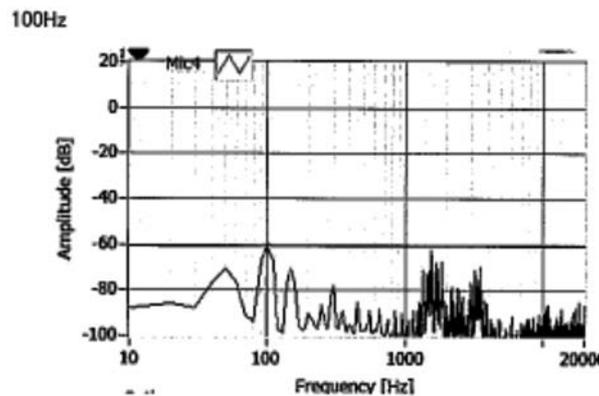


図 3.3.1-17 受信した音波スペクトル (100 Hz)

なお本 P-ROV に搭載している主要な電力機器類とその最大消費電力を表 3.3.2-2 に示す。

表 3.3.2-2 P-ROV 搭載電力機器類

機器名	最大消費電力 [W]
831Lソナー	5
P31ソナー	10
水中スピーカ	50
ハイドロフォン	1
増幅用回路	1
LAN to RS232Cコンバータ	5
LAN to GPIOコンバータ	5

② ROV 性能改良と情報収集

1) ROV 性能改良

本研究における ROV は従来型 ROV の機能に加え、小型中性子センサーも搭載するため、ROV 全体としての重量が増加する。現時点では中性子センサーの仕様は確定していないがおおよその形状や重量を想定して P-ROV を改良することとした。P-ROV の水中における上昇・下降性能は単に自重で沈降した後、水中重量を超えるスラスターの推進力で上昇する機能のみであったが、中性子センサーにより対象物の中性子数を測定するためには一定時間、センサーと対象物の距離を保つ必要があるため、ホバリング機能を持たせることとした。このためスラスター機種を 100 W 型から 200 W 型に変更させ、機数も 6 機から 8 機へ増加させるとともに駆動用モーターも 100 W から 200 W に変更して推進力を増加させた。図 3.3.2-3、表 3.3.2-3 に改良前後での ROV 運動性能の比較を示す。

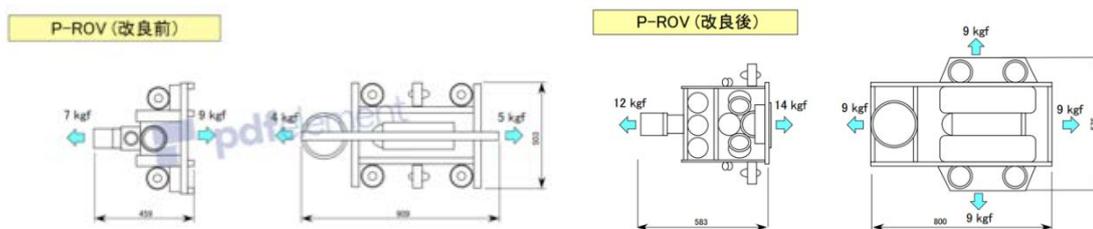


図 3.3.2-3 改良前後における ROV の性能比較

表 3.3.2-3 改良比較表

改良項目	改良前	改良後
スラスター推進力の増加	100 W 6機	200 W 8機
スラスター電力供給	ケーブルによる電圧ドロップ大	内蔵電池 (DC14 V)
ケーブルの流体抵抗	多 (太く多数のケーブル)	少 (細く少数のケーブル)
ROV自由度 (垂直移動)	自重による降下後スラスターで上昇	スラスターによる上下移動

また、電源系の改良では、ROV に搭載している主要な電力機器類を計測ユニット側(以下、制御系)で制御するため、スラスタモーター駆動系(以下、動力系)と電流消費型ソナードライブ系(以下、センサー系)は搭載バッテリー(2次リチウム電池)と昇圧コンバータで駆動することとし、地表から電力供給する方式は制御系や低消費電力型装置を担当し、通信系及び制御系の電力の欠損による無制御を回避する事とした。採用した2次充電型リチウム電池は、リチウムポリマー電池でROVを効率よく駆動するために使用される。本電池の電圧は14.8V系であるが、高圧が必要な場合は昇圧コンバータにて変換し生成することとする。電力容量は定格266.4Whのため、ROV側でスラスタ駆動を主に受け持つが通常の運転動作で数時間駆動可能である。運転時間は運転状況に依存するが本環境(静水、低速走行、移動距離は短距離)では3-4時間の駆動が可能と推定される。

また下部センサー構造体には同様なバッテリーを搭載し、計測制御系装置の電力供給に使用する。これら状況を考慮し、装置の電力試算を行うと次のとおりである。

メイン電力系(ROV駆動用)として、8機のスラスタを使用する。そのうち、上昇下降用として4機、左右前後駆動用として4機使用する。各スラスタ動力は、1機あたり最大180W、実機駆動平均は最大の1/10程度で18Wであり、4機のスラスタには平均72Wとなる。また、各方向動作での実平均電力は操作状態により変化するが、各ドライバーのピーク電流は20Aで、スラスタ駆動力として十分対応できる。(平均動力は、ピーク時の10%と推定:静水域駆動状態低速駆動)。以上の他は制御電気系ユニット及びDカメラ電力であり5W以下である。バッテリー出力電流(仕様値)は最大で120A、連続で90Aであり、十分対応可能である。

③制御・通信系改良

ROVに搭載する運転・制御機器、センサー類の制御・通信系の改良検討を実施した。

1) 電力通信系機能

電源系に関しては、POE(Power Over Ethernet)給電とバッテリー給電で構成することを検討し、ROV推進用スラスタ駆動系と電流を消費するソナードライブ系(831L、PS31)は、搭載バッテリー(2次リチウム電池)とコンバータにより駆動することとし、操作側プラットフォームから電力供給する方式は制御系や低消費電力型の装置を担当し、通信系及び制御系の電力の欠損による無制御を回避することを考慮した。

ROVの運転・通信制御系機器、SBPや中性子センサー、水中用3Dカメラ、光源等の機器に電力供給するための電力通信系のブロック・ダイアグラムを作成し、図3.3.2-4に示した。またブロック・ダイアグラムに基づいたROV内部配線図を図3.3.2-5に示す。

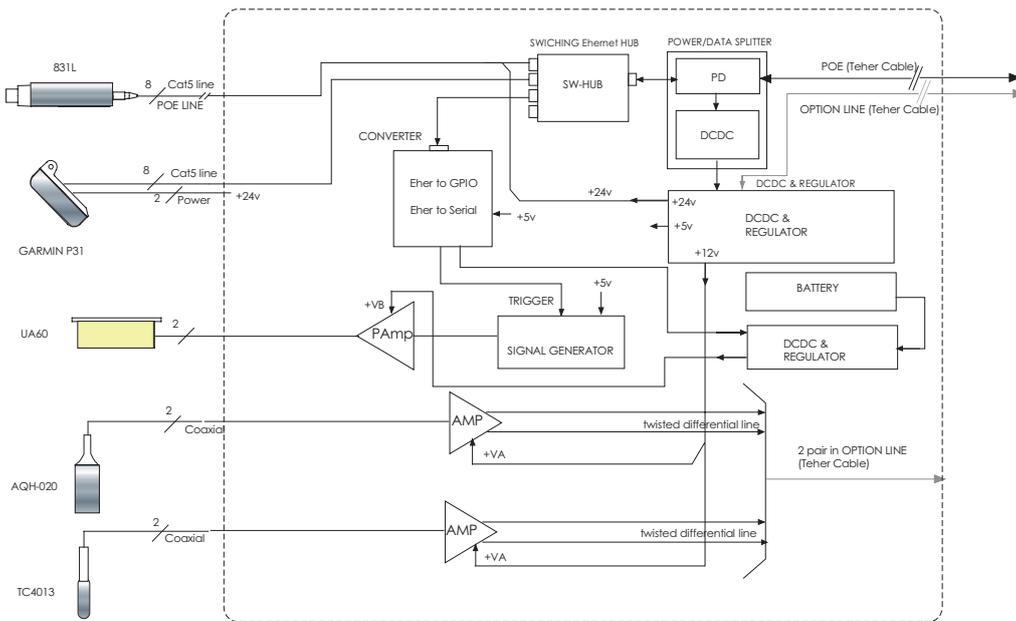


図 3.3.2-4 電力通信系のブロック図

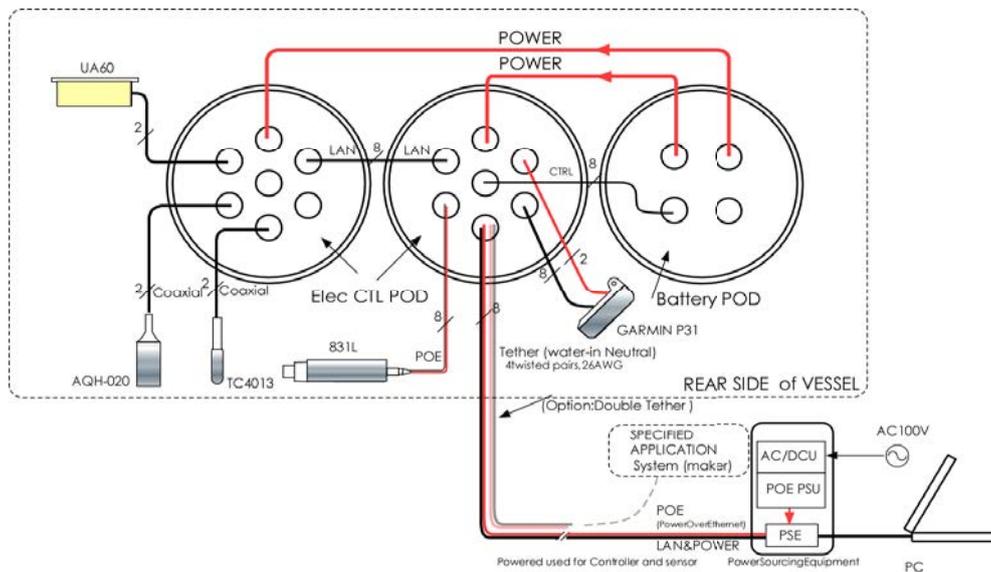


図 3.3.2-5 ROV 内部配線

2) センサーの通信用の信号処理系

ROV に搭載可能な通信制御系電子回路基板の候補を選定し、ROV 搭載の各センサー等からの計測データを操作側プラットフォームに送信させる、その逆として、プラットフォームから各センサー等に信号を送るための通信方法の検討を行い、表 3.3.2-4 に示した。

ROV のシステム内で LAN(TCP/IP)ネットワークを組むことによりプラットフォームの PC や制御器より LAN にて各装置信号でスイッチングイーサネットハブを通してプラットフォームの PC にインストールしたアプリケーションソフトにて動作可能となる。

また、シリアルコンバータを用いた通信回線では、データを時間的な系列として順次直列に送る必要があり、そのために並列のデータを受けて直列に変換する。

GPIO (General-Purpose Input/Output) コンバータは集積回路や PC ボード上の一般的なピ

ンを備えた変換器であり、その動作（入力ピンであるか出力ピンであるかを含む）は実行時にユーザによって制御可能となる。

表 3.3.2-4 センサー通信信号処理系

主要なセンサー&装置	通信方法	備 考
中性子センサー (ダイヤモンドセンサー)	SPIを採用するかどうか検討中	FPGAをROVに搭載するか どうか検討中
831L (回転ビーム式スキャンソナー)	TCP/IP (POE Ethernet)	
PS31 (マルチフェイズドアレイソナー)	TCP/IP or Garmin社の 専用ケーブル	左記の何れにするか検討中
UANM-1620 (小型化水中スピーカ)	テザーケーブル	ROV搭載のドライブアンプ から制御信号
AOH-020, TC4013 (ハイドロフォン)	テザーケーブル	アナログ信号
RS232CコンバータへのLAN	Ethernet to シリアルコンバータ	
GPIOコンバータへのLAN	Ethernet to GPIOコンバータ	
VR220 (3Dカメラ)	テザーケーブル	プラットフォームへ映像伝送
ROV推進用制御系電子回路 (推進用スラストポンプ制御)	テザーケーブル	
通信制御系電子回路 (Raspberry Pi など)	TCP/IP	

(2) PCV 模擬環境利用試験方法の検討

①水槽試験

平成 31 年度以降に、PCV 環境での実用性確認を目的として、今年度実施した第 3.3.1-(1) 項記載の SBP システム試験を PCV 模擬環境への拡張するために、JAEA 檜葉遠隔技術開発センター（以下 檜葉センター）のロボット試験用水槽にて試験要領を策定した。今回は檜葉センターに赴き、センター職員と現場の状況を確認しながら次のように定めた。

1) 供試体の種類と形状

第 3.3.1-(1) 項に記載の場合と同様、砂利、ステンレス及びコンクリートレンガの 3 種類とする。

2) 水槽中への供試体設置方法

檜葉センターのロボット試験用水槽は、直径 4.5 m、高さ 5.5 m（推進 5 m）である。この水槽への機器類設置位置を図 3.3.2-6 に示す。左が断面図、右が平面図である。SBP システムは、スピーカ、ハイドロフォンの位置を固定するハンドルに装備し、水中へ入れる。ハンドルは、水槽用ブリッジに固定する。また、供試体は水槽底面に配置し、図 3.3.2-6 右に示すように、4 箇所それぞれ設置する。

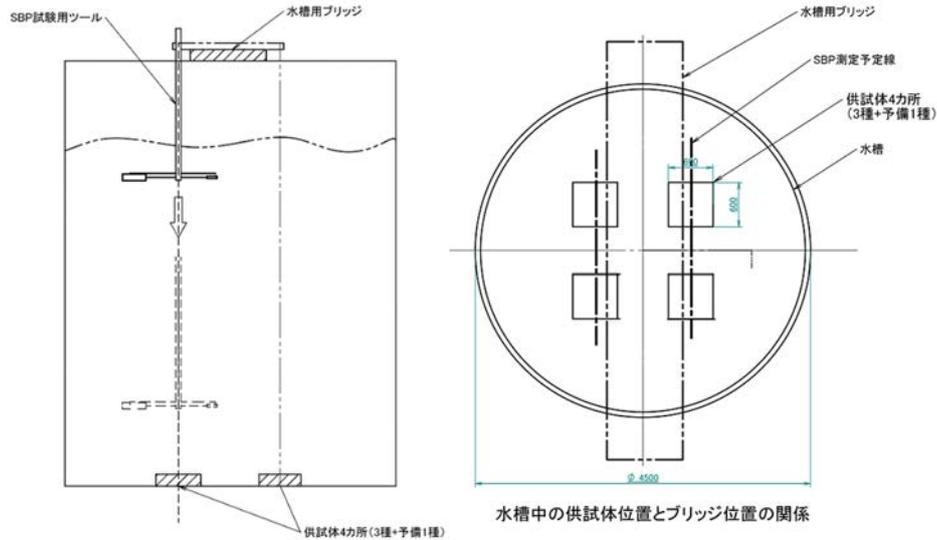


図 3.3.2-6 試験体系の概要 水槽中の供試体設置位置

3) 水槽試験用治具の設計

前項記載のようなロボット試験用水槽での試験に際し、必要となる治工具類を検討した結果、図 3.3.2-7 に示すような供試体設置用の治具を用意した。さらに、供試体の設置台として供試体載せ台（図 3.3.2-8）を設計した。これによって、供試体を 4 つに配列させて水槽へ投入することが可能になった。



図 3.3.2-7 供試体設置用治具

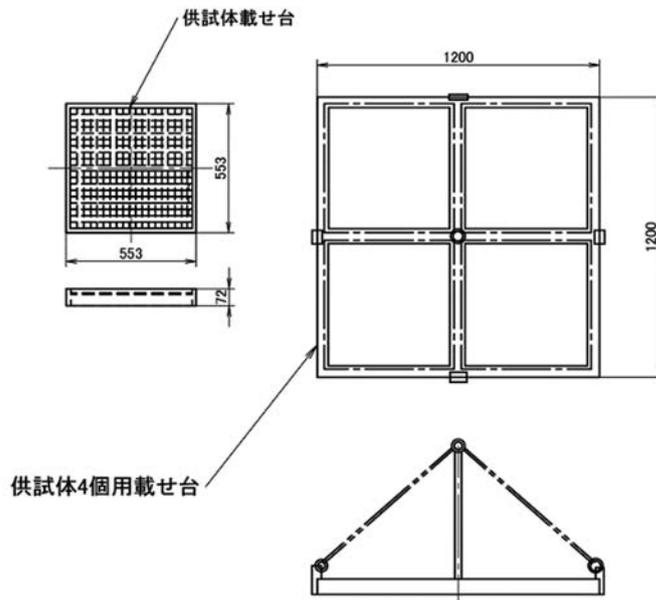


図 3.3.2-8 供試体載せ台

4) 櫓葉遠隔技術開発センターにおける試験項目

① SBP 基礎試験

SBP の試験として、今年度実施した試験内容をロボット試験用水槽に適用

② ROV 動作試験

センサー類を ROV に搭載した状況で運動性能評価、センサー動作評価を実施。

③ ROV から取得したデータの送受信と投影方法

ROV の改良検討の制御・通信系改良において ROV 搭載の各センサーや 3D カメラからのデータを操作側のプラットフォームに通信する方法を報告した。ここでは、主要なセンサー等について ROV から提供される大量の情報を調査し、遠隔操作するために必要なプラットフォームにおいて設置する環境について検討した。

1) 中性子センサー

中性子センサーの仕様は検討中であるが、仮に中性子計数率を 1 count/s、ガンマ線計数率を 1×10^6 count/s 程度と想定しても、中性子センサーからプラットフォームへの送信するタイミングは 1 回/秒程度であれば、Ethernet による通信上の問題は無いと考えられる。このため、プラットフォームでは中性子やガンマ線の計数を取り込んで結果を時系列で PC に表示・記録する。

2) 回転ビーム式スキャンソナー (831L)

仕様では 831L ソナーからプラットフォームへの通信速度は TCP/IP を使用すると、10 Mbps となっており、1 回転のスキャン毎に 283 bytes の情報を、4 秒の速度 (6 m の探査深度の場合) で出力するため、プラットフォームへの通信上の問題はほとんど無い。このため、プラットフォームでは 831L からの情報を取り込んで結果を PC に表示し、データを記録する。

3) マルチフェイズドアレイソナー

Garmin 社製の前方探査用ソナーヘッド (Panoptix PS31) は ROV に取り付け、プラットフォーム側に専用の制御・表示装置 (ecoMAP CHIRP 95sv) を設置する。両者の通信方法は TCP/IP を使用するか、或いは Garmin 社の専用ケーブルを使用するか検討中である。専用の制御・表示装置は、ROV の航跡を記録できるものの表示画面データは保存できないため、PC に接続してビットマップ (bmp) ファイルとしてキャプチャした画像を PC に転送する。

4) SBP

SBP からの計測データはハイドロフォンからのアナログ信号で、テザーケーブルを通してプラットフォーム側に送信する。プラットフォーム側では、図 3.3.1-3 に示した SBP システム構成図の内、A/D 変換器 (NI USB-4431) を経由して、SonarWiz がインストールされた専用 PC に接続する。

5) 3D カメラ (VR220)

VR220 は超広角レンズ搭載 360 度パノラマ VR 撮影用カメラモジュールで、テザーケーブルを通して映像データをプラットフォーム側に伝送する。最大解像度は 1920 x 1080 ピクセル (動画), 3280 x 2464 メガピクセル (静止画像) となっており、プラットフォーム側では画像を表示し、記録するためのプログラムをインストールした PC を準備する。

以上の各センサーや 3D カメラからのデータを受信して、遠隔操作するためのプラットフォームにおける環境をまとめて、表 3.3.2-5 に示した。

表 3.3.2-5 遠隔操作方式とプラットフォームでの環境

主要なセンサ&装置	プラットフォームにおける環境	通信方法
中性子センサ	PC	SPIを採用するかどうか検討中
831Lソナー	PC	TCP/IP(POE Ethernet)
PS31ソナー	専用の制御・表示装置(ecoMAP CHIRP 95sv)	TCP/IP or Garmin社の専用ケーブル
SBPシステム	Sonar Wizに対応したPC	テザーケーブル
3Dカメラ	PC	テザーケーブル

6) VR (Virtual Reality) 技術の利用検討

JAEA 檜葉センターの担当者と打ち合わせを行い、檜葉センターで利用できる VR 技術や設備を調査した。その結果、VR 画像の投影については、

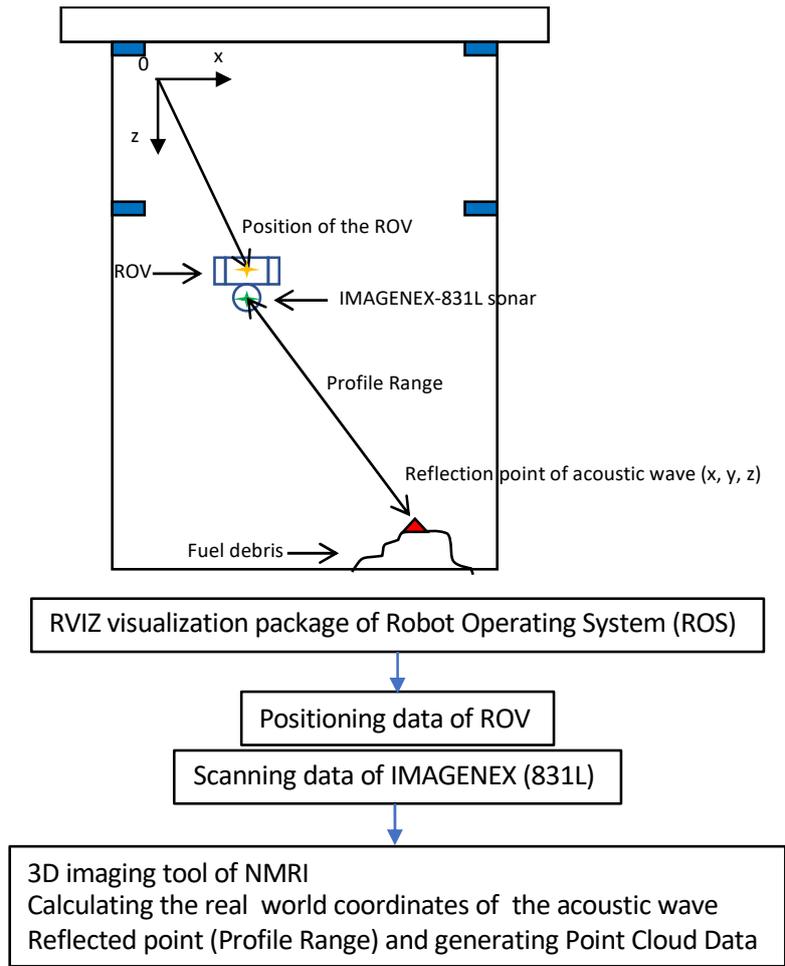
- ・CAVE 型（スクリーンタイプ）VR システムへ投影
- ・HMD 型（ゴーグルタイプ）VR システムに投影

の 2 通りの方法があり、それぞれの方法の場合必要となる機器は、

- ・CAVE 型の VR システムに投影する場合は VR システムと投影用ソフト、
- ・HMD 型 VR システムに投影する場合は、HMD 型 VR 機器、HMD 型 VR 機器動作用 PC 及び投影用ソフトである。

また、3D カメラの画像データを檜葉センターの CAVE 型（スクリーンタイプ）VR システムへ投影する場合、現状において画像データを VR 用に変換するのに数時間以上の処理時間が掛かることが判明した。このため、今年度は VR 用の変換処理が効率的な HMD 型 VR 機器を購入したが、来年度以降投影用ソフトを整備して、検討を進める予定である。

次に、檜葉センターの CAVE 型 VR システムに投影するデータとして、3D カメラの画像はなく、回転ビーム式スキャンソナー(831L)のデータを投影するための予備的な検討を実施した。図 3.3.2-9 に 831L のソナーデータを VR システムに投影するために PCD(Point Cloud Data)に変換する手順を示した。PCD は或る基準点を原点としたデータの (X, Y, Z)座標と数値から構成される点データ群である。831L の試験データを PCD に変換し、3 次元画像として表示して図 3.3.2-10 に示した。以上の検討より、ソナーデータの VR システムへの投影について見通しが得られた。



- Concern (1) : If positioning system was improved or changed, 3D imaging tool should be modified
- Concern (2) : In order to implement 3D display in real time, it needs to use RVIZ visualization package of ROS

図 3. 3. 2-9 ソナーデータを点群データに変換する手順

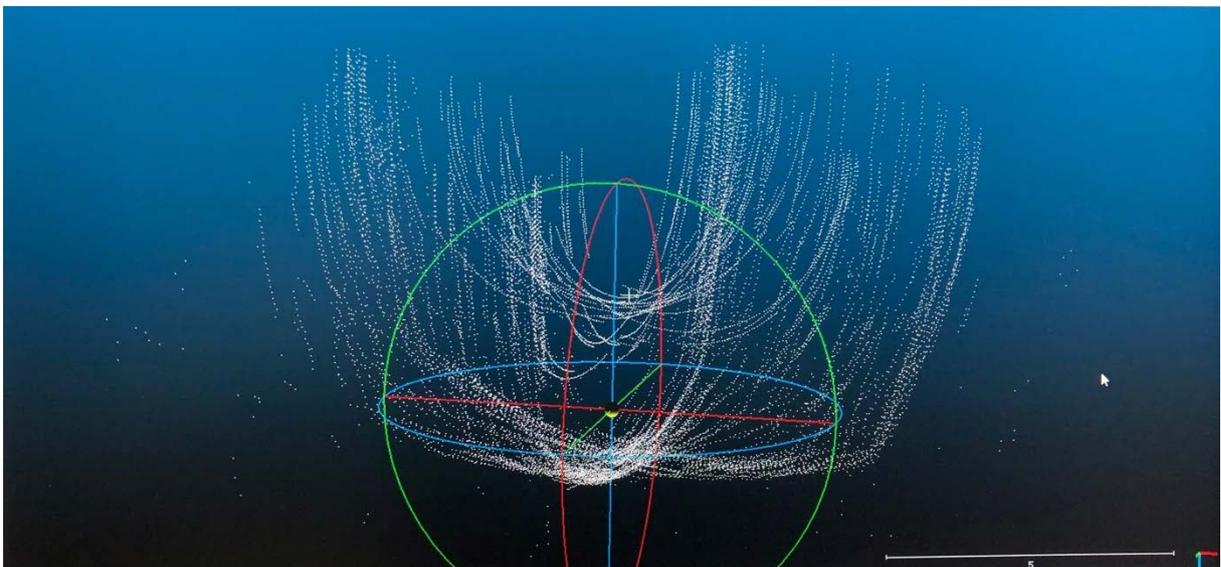


図 3. 3. 2-10 ソナーデータを点群データに変換して 3 次元画像に変換した結果

参考文献

- [3.3.1-1] オーシャンエンジニアリング株式会社 <http://ocean-eng.com/publics/index/19/>
- [3.3.1-2] H.Uetsuka, F.Fumihisa, "Comparison Sample examination and related study at JAERI", Proceedings of Three Mile Island Reactor Pressure Vessel Investigation Project Open Forum, pp.269-280, 1994.
- [3.3.1-3] 理科年表 平成 21 年 p 422

3.4 研究推進

本研究を推進するにあたり、研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉国際共同研究センター（CLADS）等との連携はメールベースで情報交換を行うとともに、定期的に研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

平成 30 年 10 月 9 日に本研究課題における研究従事者や協力者を集め、キックオフミーティングを KEK にて実施し、廃炉国際共同研究センター（CLADS）から廃炉研究の現状を紹介して頂くとともに参加者全員で意見交換を行った。また、研究代表者と一部の研究実施者が平成 30 年 11 月 9 日に開催された CLADS 報告会に出席し、ニーズ側の意見を確認した。平成 31 年 11 月 16 日には、KEK にてトランジスタの耐放射線評価に関する打合せを行った。平成 31 年 1 月 31 日には KEK にて P0 中間フォローが実施され、研究代表者と各機関代表者が各研究項目間の進捗状況を説明し、P0 から適切な助言を頂いた。平成 31 年 2 月 4 日には NIMS において、NIMS が担当するダイヤモンド検出器と KEK が担当する集積回路、NMRI が担当する ROV 間のインターフェースの仕様について打合せを行った。平成 31 年 2 月 14 日には NMRI において、ROV の仕様について打合せを行った。

4. 結言

本業務では、1F の炉内状況の把握、燃料デブリ取出しの早期実現、臨界リスク管理に資するため、燃料デブリから放出される自発核分裂中性子の計測に狙いをさだめ、高 γ 線環境下でも安定に動作する小型ダイヤモンドセンサーと中性子コンバータからなる中性子検出用センサーを開発し、マルチフェイズドアレイ・ソナーや表層下部音波探査装置（SBP）を利用した水中音響探査技術や VR（Virtual Reality）システムなどによる遠隔操作技術と組み合わせることで水面下にある燃料デブリの存在を「その場」で明らかにする遠隔デブリ探査技術を整備することを実施している。

以下に、3 カ年計画の 1 年目である本年度の業務実績と次年度の計画を述べる。

(1) 耐放射線集積回路の研究開発と核分裂中性子測定システムの開発

① 耐放射線トランジスタおよび集積回路の研究開発

1 MGy まで動作するトランジスタの開発を目標として、マトリックススイッチをトランジスタの耐放射線性能を測定するための装置に組み込み、評価システムを整備し稼働を確認した。TSMC65nmLP-CMOS プロセスを用いて評価用トランジスタ、高速信号処理回路、比較器、差動オペアンプ、発振回路、デジタルアナログコンバータ、アナログデジタルコンバータ及びデジタル I/O インターフェースのサンプルをデザインし製作した。

次年度は、トランジスタの耐放射線化と並行して信号処理集積回路デザインの最適化を行い、動作を確認する。また、入手できるダイヤモンド検出器のサンプルと結合させ評価し、最終年度に向けた問題点の洗い出しを行う。また、トランジスタ評価を継続し、その結果を取りまとめた後、トランジスタ構造の修正を行い、平成 30 年度に検討した中性子検出ダイヤモンドセンサー用信号処理集積回路のデザインを開始する。また、ダイヤモンド検出器サンプルの評価結果を回路デザインにフィードバックする。

② 核分裂中性子測定システムの開発

国際廃炉研究開発機構（IRID）が公表している 1F 原子炉格納容器内部の線量環境（数 10 Gy/h）下において、燃料デブリから放出される中性子を中性子束が $10^2 \sim 10^8$ n/cm²/s の広ダイナミックレンジで検知可能な核分裂中性子測定システムの開発を目標として、高エネルギー加速器研究機構が所有するスーパーコンピューターシステムに汎用粒子輸送計算コード PHITS をインストールし、核分裂中性子測定システム開発に必要なシミュレーション計算を実施するための環境整備を行った。ダイヤモンド検出器の有感層厚さを 1 μ m から 500 μ m まで変化させて、¹³⁷Cs からの γ 線による有感層のエネルギー付与を計算し、有感層厚さに対する γ 線影響の評価を行った。システム設計に必要なダイヤモンド検出器について、中性子感度評価のためのシミュレーション計算を実施した。

次年度は、入手可能なダイヤモンド検出器を用いた中性子感度や γ 線影響の実測と汎用粒子輸送計算コード PHITS によるシミュレーション計算をもとに、システム設計を行う。さらに、水中を模擬した実験体系により、ダイヤモンド検出器の応答評価を行う。

(2) 中性子検出用ダイヤモンドセンサーの研究開発（再委託先：物質・材料研究機構）

① 高品質ダイヤモンド成長に関する研究

高品質なダイヤモンド pin 構造を作製するために、{111} 単結晶ダイヤモンド基板表面において、原料気体として 0.05% で水素希釈されたメタンガスを用いて CVD 成長した結果、原子間力顕微鏡 (AFM) 観察により明瞭な原子層ステップ (0.2 nm) の形成を確認した。結晶成長品質の評価は、NIMS に既存の 3 次元ラマンマッピング装置により行い、ラマンピーク半値幅の分析から、基板結晶と同等の高い結晶品質が確認された。

次年度は、pin 構造の内蔵電位による低電圧駆動でキャリアを収集するために、不純物の取り込みを抑えた高純度ノンドープ層 (i 層) の成長条件を探索する。不純物の取り込みを抑えるために有効と考えられるダイヤモンド基板のオフ角制御を実施し、異なるオフ角を持つ複数基板において不純物取り込みのオフ角依存性を評価する。

② センサー形成プロセスに関する研究

センサーに用いるダイヤモンド pin 接合構造を形成するための準備として、反応性イオンエッチングによる構造加工試験を開始した。エッチング用のマスク材料には Al を用いた。共焦点顕微鏡により、1) 反応性イオンエッチング前、2) エッチング後、3) マスク材除去後の 3 度、Al マスクの厚みとエッチングされたダイヤモンドメサ (丘) の深さを計測し、エッチングレートを導出したところ、Al マスクのエッチングレートは 0.1 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、ダイヤモンドは 1.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ であることがわかった。

次年度は、平成 30 年度に設計した構造をもとにダイオードを試作する。マイクロ波プラズマ化学気相成長法により p 層、i 層、n 層を絶縁性ダイヤモンド基板上に積層成長させる。反応性イオンエッチングにおいて、平成 30 年度に実験的に求めたエッチング速度、およびマスク/ダイヤモンドのエッチング速度比を使い、200 μm 程度のメサ (丘状) 構造ダイオードを作製する。マスク材にはアルミ膜を用い、その形成には物材機構に既存の EB 蒸着を用いる。化学洗浄によりマスクを除去した後、メサトップ、メサボトムにオーミック電極を EB 蒸着して pin ダイオード素子形成する。得られた pin ダイオードの静特性、温度依存性を物材機構に既存のプロバにより測定し、理想特性との比較から (2) ①で行う i 層結晶成長および本項目の pin ダイオード形成にもフィードバックする。優れた静特性の pin ダイオードを選定し、信号読み出し兼・電圧印可用のワイヤ結線を行い、センサー評価に用いる。

③ 中性子検出用センサー構造に関する研究

中性子コンバータ膜の材料として、物材機構で超高品質な単結晶合成が可能な六方晶 BN (hBN) を優先的に用いる事とした。高品質な単結晶であるが故に精密なシミュレーションが可能であること、放出核の飛程が小さいため、最終的にセンサーに用いた場合、線感度の低減が可能であることがその理由である。モンテカルロシミュレーションコードを用い、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応で放出される 1) 1.47 MeV α 粒子、2) 0.84 MeV Li イオンについて、BN 及びダイヤモンドのそれぞれの荷電粒子に対する阻止能 dE/dx から荷電粒子が全エネルギーを付与するのに必要な膜厚を求めた。BN で必要な膜厚は、1.47 MeV α 線が 4.7 μm 、0.84 MeV Li イオンが 1.9 μm であった。ダイヤモンドにおいては、1.47 MeV α 線が 3.0 μm 、0.84 MeV

Li イオンが 1.3 μm であった。この結果から、中性子コンバータ膜厚を最大で約 5 μm 、ダイヤモンド pin ダイオードの有感層厚さを約 3 μm と見積もった。

次年度は、中性子コンバータからの放出核種を想定し、KFK にて α 粒子照射実験を行い、センサー性能を左右する i 層の電荷収集効率を評価する。それに先立ち、物材機構に既存のプロローバで深紫外光源を用いた光電流評価を行い、その結果を素早く素子作製工程にフィードバックする。さらに、最終年度の実装に向け、中性子コンバータとして NIMS において実績のある高品質六方晶窒化ホウ素 (hBN) 単結晶を用いたセンサー素子化試験を開始する。

(3) 複合型センサーを搭載した水中ロボットによる遠隔計測技術の開発

(再委託先：海上技術安全研究所)

① 音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発

音響探査装置と中性子センサーを組み合わせた複合型センサーの開発では、SBP システムの音源の周波数を変化させることによって、堆積層の分析厚さに対応するための見通しがついた。また、SBP システムを形成するデバイスを小型化した。

次年度は、マルチフェイズドアレイ・ソナーの小型・軽量化の検討結果に基づき、小型化したソナーの性能試験を行い、所定の性能であることを確認後、複合センサーの一部となるよう整備する。SBP についても同様に小型・軽量化の検討結果に基づき、小型化した SBP の性能試験を行い、所定の性能であることを確認後、複合センサーの一部となるように整備する。

② 原子炉外部から ROV による遠隔計測を可能にする遠隔操作技術の開発

搭載する複合型センサーの形状、重量及び性能を考慮し、現有 ROV の推進力とその制御性能を改良するための設計・改造を実施した。また、原子炉格納容器環境の模擬に必要な治工具類としては、JAEA 檜葉センターのロボット試験水槽試験に適合するような形状の治具を検討した。また、ROV から提供されるデータの VR 施設への送信と投影方式について、JAEA 檜葉センターと打合せを行い、方針を定めた。

次年度は、平成 30 年度に行った設計結果を踏まえて、複合センサーを現有 ROV へ搭載できるように改良する。また平成 30 年度に引き続き、実機 PCV 環境模擬に必要な設備および治工具類を製作する。製作した複合センサーを水中ロボットに搭載し、正常に動作ならびに通信できることを確認する。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携はメールベースで情報交換を行うとともに、定期的に研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

次年度も、研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

以上、3 カ年計画の 1 年目である本年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

