JAEA-Review 2020-027 DOI:10.11484/jaea-review-2020-027



耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発 (委託研究)

- 令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-

Development of Radiation Hard Diamond Image Sensing Devices (Contract Research) -FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project-

> 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター 産業技術総合研究所

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

January 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2021

耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発 (委託研究) -令和元年度 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 廃炉環境国際共同研究センター

産業技術総合研究所

(2020年10月8日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)では、令和元年度 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、「耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発」の令和元年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は極めて高い耐放射線性が確認されているダイヤモンド半導体素子を利用して、耐放射 線性可視光固体撮像素子の実現を目標として研究開発を行うものである。開発目標として、ダイ ヤモンド金属半導体電界効果トランジスタ(MESFET)をベースとして電荷結合素子(CCD)の基 本動作となる電荷転送動作を確認する。また、ダイヤモンド固体撮像素子が可視光における感度 を得るために、中性不純物準位を用いた革新的ダイヤモンドフォトダイオードを試作し評価を行 う。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、産業技術総合研究所が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境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

i

JAEA-Review 2020-027

Development of Radiation Hard Diamond Image Sensing Devices (Contract Research)

- FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project -

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development Japan Atomic Energy Agency Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

(Received October 8, 2020)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2019.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). 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 FY2019, this report summarizes the research results of the "Development of radiation hard diamond image sensing devices".

The research objective of this project is to develop image sensing devices which work under the high radiation condition. The devices will be realized using radiation hard diamond semiconductor devices as charge transfer devices and photodetectors. The research project has mainly two targets such as to confirm charge coupled devices operation on diamond unipolar devices and to characterize photo conductivity of diamond detectors.

Keywords: Diamond, Unipolar Semiconductor Device, Field-effect Transistor, Charge Transfer, Photo Detector

This work was performed by National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 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(継続分)	2
3.	令和元年度 採択課題	5
付納	録 成果報告書	. 9

Contents

1.	Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	. 1
2.	Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~	. 2
3.	Accepted Proposal in FY2019	. 5
Ap	pendix Result Report	. 9

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。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電 カホールディングス(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(令和元年度より新設)に再編した。

- 1 -

2. 平成 30 年度 採択課題(継続分)

平成30年度採択課題(継続分)については以下のとおりである。

課題数:19課題

共通基盤型原子力研究プログラム 11 課題

(若手研究6課題、一般研究5課題)

課題解決型廃炉研究プログラム 6課題

国際協力型廃炉研究プログラム 2課題

(日英共同研究)

平成 30 年度 採択課題一覧

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	山﨑 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	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
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

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

		i
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
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	渡邉 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	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

JAEA-Review 2020-027

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度は、4 つの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31年4月24日~令和元年6月7日
 令和元年5月30日~令和元年7月18日 ※日露共同研究のみ

· 課題数:19課題

 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題 (若手研究2課題、一般研究5課題)
 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題 (日英共同研究2 課題、日露共同研究2 課題)
 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 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た。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、採択課題を決定 した。

令和元年度 採択課題一覧

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
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海 水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボッ トの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関	
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋 内放射線源分布計測	重 谷瓜	名古屋大学	
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ス トレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学	
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オン ラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学	
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな 評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構	
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁	産業技術総合 研究所	

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
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデス タル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技 術を用いた分別方法の研究開発	渡邉 大輔	日立 GE ニュークリア・ エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物 の安定固化技術の開発	竹下 健二	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによ る圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

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
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアル カリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で 効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学

国際協力型廃炉研究プログラム(日露共同研究)

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関 する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のため の遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデ ブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブ リ劣化機構の解明	大貫 敏彦	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

本報告書は、採択課題のうち、共通基盤型原子力研究プログラム(一般研究)「耐放射線性 ダイヤモンド半導体撮像素子の開発」の令和元年度の研究成果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.

令和元年度

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

耐放射線性ダイヤモンド半導体 撮像素子の開発 (契約番号 311126)

成果報告書

令和2年3月

国立研究開発法人産業技術総合研究所

JAEA-Review 2020-027

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科学技術・人材育成推進事業」によ る委託業務として、国立研究開発法人産業技術総合研究所 が実施した「耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開 発」の令和元年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1. はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2. 業務計画・ 2.1-1 2.1 全体計画・ 2.1-1 2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法・ 2.2-1 2.2.1 ダイヤモンド MESFET の CCD 動作確認と耐放性評価・ 2.2-1 2.2.2 ダイヤモンド有感層の開発と評価・ 2.2-1 2.2.3 研究推進・ 2.2-1
 3. 令和元年度の実施内容及び成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4. 結言
参考文献

表一覧

表1	ダイヤモンドとシリコンの材料特性の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	· 1	-1
表 2	業務項目別実施区分・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2. 1 [.]	-2
表 3	ダイヤモンド中の不純物濃度非破壊評価測定例・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2 [.]	-3

図一覧

図 1	本業務の全体計画図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2. 1–1
図 2	ダイヤモンドのバンドギャップ内に形成される中性不純物準位の	
	エネルギー位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 2–2

略語一覧

CCD	: Charge coupled device	(電荷結合素子)
MESFET	「:Metal-semiconductor field-eff	ect transistor
		(金属半導体電界効果型トランジスタ)
MOS	: Metal-oxide-semiconductor	(金属酸化物半導体)

概略

福島第一原子力発電所の廃止措置を加速するため、ダイヤモンドを用いた耐放射線性可視 光固体撮像素子を開発する。開発目標として、ダイヤモンドトランジスタで電荷結合素子 (CCD)の基本動作となる電荷転送動作をX線積算線量10 MGy 照射後の動作が実証されてい るダイヤモンド MESFET にて確認する。また、ダイヤモンド固体撮像素子が可視光における 感度を得るために、中性不純物準位を用いた革新的ダイヤモンドフォトダイオードを試作し 評価を行う。

本事業では耐放性ダイヤモンド CCD の実現のため、以下の2つの研究開発を行う。

(1) ダイヤモンド MESFET の CCD 動作確認と耐放性評価

小型で振動にも強く、高精細な耐放射線性 CCD カメラを実現するには、すでに 10 MGy 以 上の放射線耐性が実証されているダイヤモンド MESFET を利用して、光励起したキャリアを ダイヤモンド中で低損失に電荷転送できるかどうかを確認する必要がある。まず、第一に p 型ダイヤモンド半導体を用いた MESFET でゲートアレイ構造を形成し、電子線や紫外線など によって励起した正孔の CCD 転送が可能であるかを試みる。

なお、Si イメージセンサーは一般に MOS 界面における反転層を用いて電荷転送する構造を とっている。ダイヤモンド半導体でも近年 Al₂O₃ を利用して反転型 MOSFET が実現しており、 これをイメージセンサーに利用できれば開発の大幅な加速が可能である。Si/CCD および CMOS イメージセンサーの放射線耐性で課題となる MOS 界面での欠陥形成に着目し、ダイヤモ ンド/Al₂O₃ 界面での放射線に対する耐性の有無を評価する。具体的には 2 MGy を超える放射 線耐性評価を目標とする。

(2) ダイヤモンド有感層の開発と評価

ダイヤモンドはバンドギャップが 5.5 eV と大きいため、可視光のエネルギー範囲(1.7~ 3.2 eV)では価電子帯の電子を伝導帯まで励起して自由電子とすることができず、光を電気 信号として取り出せない。この問題を解決するため、ダイヤモンド中に存在する中性不純物 準位、特に窒素もしくはリンによる不純物準位を用いて有感層とすることを試みる。ダイヤ モンド中の窒素やリンは 1.4 eV もしくは 0.6 eV 程度の活性化エネルギーを持っており、室 温においてはドーピングした不純物のうち 99%以上が中性となっている。これらの活性化エ ネルギーは可視光のエネルギーより小さいため、可視光吸収させれば不純物をイオン化して 自由電子を伝導帯に励起することが可能である。ここでは、中性不純物がドープされたダイ ヤモンド抵抗体に対して可視光によって伝導性がどの程度の効率で制御できるかを評価する。

また、CCD による低損失動作かつ画素の高密度化を前提として、窒素およびリンドープ膜の積層構造とし、窒素ドープ有感膜にて形成した自由電子をリンドープ膜に輸送して利用することが可能であるかを評価する。

本プロジェクトでは先進的なデバイスの開発と同時並行して、準量産性技術についても検 討を行い、開発後の速やかなプロトタイプ試作および実用化を目指す。

1. はじめに

シリコンはγ線、中性子への耐性が低く、シリコン半導体をベースとした固体撮像素子である CCD カメラの放射線耐性は1 kGy 程度と著しく低い。これに対して放射線耐性が1 MGy と高い撮 像管は大型な上に機械的振動に弱く消費電力も大きい。また、画像解像度は CCD と比べて 1/100 程度と低く今後の大幅な画像の鮮明化も難しい。

これに対して、ダイヤモンドは炭素による単元素結晶かつ、シリコンと同じ結晶構造を持つ 半導体であるが、結晶を構成する炭素元素同士の結合が強いため、大きなバンドギャップ、高い キャリア移動度や高温でも低い真性キャリア密度などの特徴があり、これによりダイヤモンドを 用いた半導体素子は高速・低損失動作、超高温動作などが可能である。また、X線への耐性は10 MGy 以上であり、中性子への耐性もシリコンと比較して4桁以上高い。現在、半導体素子として 主として用いられているシリコンとの比較を表1にまとめた。

	ダイヤモンド	シリコン
バンドギャップ (eV)	5.5	1.1
電子・正孔の移動度 (cm²/Vs)	3800	1000
熱暴走温度 (℃)	1400 *Siの200°Cに相当	200
γ線耐性	0	×
中性子耐性	0	×

表1 ダイヤモンドとシリコンの材料特性の比較

ダイヤモンドは現時点でも放射線検出器として実用化されているが、これまでに研究代表者が 参画し実施している平成 24 年度原子力システム研究開発事業「過酷事故対応を目指した原子炉 用ダイヤモンド半導体デバイスに関する研究開発」では、半導体基本素子である SBD や MESFET の 耐環境特性の評価が行われ、450 ℃の高温環境や、X 線積算線量 10 MGy 照射後でもダイヤモンド素 子が動作可能であることが確認されている。 また、Si や SiC では、³⁰Si(n, γ) ³¹Si(T_{1/2}=2.7 h, β -)→ ³¹P 反応があり、閾値などの半導体素子特性の変動が起こるが、同事業にてダイヤモンド ではこの反応による材料への影響がないことも確認されている。

さらに、この結果を受けて、平成 28 年度「原子炉計装の革新に向けた耐放射線・高温動作ダ イヤモンド計測システムの開発とダイヤモンド IC の要素技術開発」において、耐放性ダイヤモ ンド MESFET を利用した前置増幅器の開発が進められており、ダイヤモンドを用いた耐放性半導 体革新素子の開発が急速に進められている。

上記の研究開発によりダイヤモンドは放射線検出器用の材料のみならず、半導体電子素子材料 としても環境性能に優れていることが明らかになってきたものの、ダイヤモンド特有の不純物ド ーピング技術や素子試作プロセスが必要であることや、ウェハサイズの制限に起因する素子歩留 まりの低さ、および素子歩留まりの低さによる素子開発の困難さの問題があり、半導体特性の確認が基本小型素子に限定されている状況にある。これにより、本来半導体の多彩な特性を利用した各種機能がダイヤモンドで得られていない状況にある。本事業では、基本特性の確認にとどまっているダイヤモンド半導体において安定プロセスの利用により、世界で初となるダイヤモンドの CCD 動作の確認と可視光カメラへの応用を目標としている。また、プロセス開発の過程において、量産化を前提とした実用的低コスト・低欠陥プロセスに重点を置いて研究開発を行う。

本事業によりダイヤモンドにおける CCD 動作および可視光有感層の開発に成功した場合、高い 放射線耐性を有する小型固体撮像素子への速やかな展開が可能となり、現在使用している小型 CCD カメラのメリットと放射線耐性を併せ持つ機器が実現し、福島第一原子力発電所廃炉事業へ の活用が可能となる。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図および業務項目別実施区分を図1および表2に示す。

年度 項目	令和元年度	令和2年度	令和3年度
 (1) ダイヤモンドMESFETのCCD動作 確認と耐放性評価 ①耐放射線MESFETの作製 	試作&評価	試作&評価	
②MESマルチゲートの作製と電荷 転送特性の確認	ブロセステス	マルチゲート試作&評価	試作&電荷転送評価
③MOSダイオードの試作と耐放性 評価	試作&IV評価	試作&耐放評価	
 (2) ダイヤモンド有感層の開発と< 評価 ①NおよびPドープダイヤの不純 物高濃度化 	試作&評価	不純物高濃度化試作&評価	超高濃度化試作8評価
②中性不純物準位の <mark>可視光感応</mark> 性評価	≼試作準備	● Nドープ模試作&評価	高濃度膜試作&評価
③Pドープ/Nドープ積層感応膜に おける電荷輸送評価		準備	輸送特性評価
(3) 研究推進	進捗会議	進捗会議	進捗会議
	まとめ・評価	あまとめ・評価	まとめ・評価

図1 本業務の全体計画図

表 2 業務項目別実施区分

業務項目	実施場所	担当責任者
(1) ダイヤモンドMESFETのCCD動	大阪府池田市緑丘1-8-31	産総研
作確認と耐放性評価	産総研関西センター	主任研究員
		梅沢 仁
① 耐 放 射線 MESFET の 作 製	大阪府池田市緑丘1-8-31	産総研
	産総研関西センター	主任研究員
		梅沢 仁
2MESマルチゲートの作製と電	茨城県つくば市梅園1-1-1	産総研
荷転送特性の確認	産総研つくば中央第二	研究チーム長
		牧野 俊晴
	北海道札幌市北区北13条西8丁目	北海道大学
	北海道大学	准教授
		金子 純一
③MOSダイオードの試作と耐放	茨城県つくば市梅園1-1-1	産総研
性評価	産総研つくば中央第二	研究チーム長
		牧野 俊晴
	北海道札幌市北区北13条西8丁目	北海道大学
	北海道大学	准教授
		金子 純一
(2) ダイヤモンド有感層の開発	大阪府池田市緑丘1-8-31	産総研
と評価	産総研関西センター	主任研究員
		大曲 新矢
①NおよびPドープダイヤの不純	茨城県つくば市梅園1-1-1	産総研
物高濃度化	産総研つくば中央第二	主任研究員
		加藤 宙光
 ②中性不純物準位の可視光感応 	大阪府池田市緑丘1-8-31	産総研
性評価	産総研関西センター	主任研究員
		大曲 新矢
(3)研究推進	大阪府池田市緑丘1-8-31	産総研
	産総研関西センター	主任研究員
		梅沢 仁

2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和元年度の計画の概要は以下である。

2.2.1 ダイヤモンド MESFET の CCD 動作確認と耐放性評価

2.2.1-1 耐放射線 MESFET の作製(産総研)

ダイヤモンド半導体において CCD 動作を確認するために、耐放射線 MESFET を試作する。 MESFET はホウ素ドープ p 型膜上に形成する。合成したダイヤモンド p 型膜に耐放射線性を 有するオーミック電極およびショットキー電極を形成し MESFET とする。

2.2.1-2 MES マルチゲートの作製と電荷転送特性の確認(産総研、北海道大学)

MESFET のマルチゲート化が可能であるかを評価するため、プロセステストを行う。マル チゲートアレイの作製方法について、各種プロセスを試みる。シミュレーションによりゲ ート長およびゲート間隔に対して電荷損失を評価する。

2.2.1-3 MOS ダイオードの試作と耐放性評価(産総研、北海道大学)

ダイヤモンド MOS ダイオードを試作する。電極には耐放性が実証されている Ru を用いる。ダイヤモンド MOS ダイオードに対して電気特性および容量特性を評価する。

2.2.2 ダイヤモンド有感層の開発と評価

2.2.2-1 Nおよび Pドープダイヤの不純物高濃度化(産総研)

ダイヤモンド有感層の形成における条件出しを行う。合成条件の変化による結晶品質の 変化について評価を行う。

2.2.2-2 中性不純物準位の可視光感応性評価(産総研)

中性不純物準位を効率的に評価するため、非破壊でのドーピング濃度評価技術を確立する。

2.2.3 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。

3. 令和元年度の実施内容及び成果

3.1 ダイヤモンド MESFET の CCD 動作確認と耐放性評価

3.1.1 耐放射線 MESFET の作製⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

ダイヤモンド半導体において CCD (Charge coupled device)動作を確認するために、耐放 射線 MESFET を試作した。MESFET (Metal-semiconductor field-effect transistor) はホウ 素ドープ p 型膜上に形成した。合成したダイヤモンド p 型膜に耐放射線性を有するオーミッ ク電極およびショットキー電極を形成し MESFET とした。

3.1.2 MES マルチゲートの作製と電荷転送特性の確認⁽¹⁾(産総研、北海道大学)

撮像素子の実現には、フォトディテクターのほか、フォトディテクターで形成したキャリ アを転送させるための CCD もしくはノーマリオフ型素子回路 (three-transistor active pixel sensor)の実現が必要である。今年度は MESFET のマルチゲート化が可能であるかを 評価するため、プロセステストを行った。特にマルチゲートアレイの作製方法について、EB リソグラフィをベースとしたリフトオフプロセスを試みた。

3.1.3 MOS ダイオードの試作と耐放性評価⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾(産総研、北海道大学)

一般に、撮像素子はフォトダイオードに 3 つのノーマリオフ型 FET (主に Metal-oxidesemiconductor field-effect transistor、MOSFET)を組み合わせることで一つの画素を構 成可能であり、Three transistor active pixel image sensor として知られている。ノーマ リオフ型ダイヤモンド MOSFET の耐放射線性が確認できれば、一般に使われている設計をそ のまま利用できるため、開発を早めることが可能でありこれの検討を行う。

3.2 ダイヤモンド有感層の開発と評価(産総研)

3.2.1 Nおよび Pドープダイヤの不純物高濃度化

ダイヤモンドの有感層の形成における条件出しをおこなった。合成条件の変化による結晶 品質の変化について評価を行った。

ダイヤモンドは室温で 5.5 eV (225 nm)のバンドギャップを有しており、深紫外域に極め て高い感度持つ光検出器として動作する。高純度なダイヤモンド結晶は、可視光域には感度 を持たず、深紫外線にのみ感度を有する"ソーラーブラインド型光検出器"として機能する。 可視光域に光感度を持たせるためには、不純物ドーピングによる中性不純物準位の形成が必 要である。ダイヤモンドのバンドギャップ内に形成される、中性不純物準位のエネルギー位 置を図 2 に示す。

ダイヤモンドの置換原子位置に、第 III 族元素のホウ素 (B) が組み込まれると、価電子 帯から 0.37 eV 上部の位置にアクセプタ準位を形成し、良好な p 型半導体として動作する。 n 型ドーパントとしては、第 V 族元素の窒素 (N) およびリン (P) が候補となる。P ドーピ ングの場合は、伝導体上端 (Ec) より 0.6 eV 下部にドナー準位を形成し、キャリア濃度制 御を伴う良好な n 型半導体として動作することが確認されている。N ドーピングについては、 B、P と同様にダイヤモンド格子位置に混入した場合に、1.4~1.7 eV のドナー準位 (N1) を 形成する。また、N 不純物がペアとして混入した場合は、4.0 eV の深いドナー準位 (N2) を 形成することが知られている。N による不純物ドーピングでは、深いドナー準位のため室温 でのキャリア活性化が難しく、絶縁体となる。一方で、可視光照射下では、N 中性不純物準 位からのキャリア励起により、光感度を持たせることが原理的に可能である。可視光の光エ ネルギーは約 1.6~3.3 eV (80~750 nm) であり、ダイヤモンドバンドギャップ中の N1 準位 は、可視光のセンシングに有望な不純物準位である。

3.2.1-1 Nドープダイヤモンド

高出力マイクロ波励起プラズマ CVD 装置を用いて、ダイヤモンドの有感層形成における 条件出しを行った。N 濃度の異なるダイヤモンド結晶を(100)種基板上に成長した。



図 2 ダイヤモンドのバンドギャップ内に形成される中性不純物準位のエネルギー位置 (Ec:伝導帯、Ev:価電子帯、Ed:ドナー準位、Ea:アクセプタ準位)

3.2.1-2 P ドープダイヤモンド

P ドープダイヤモンドの有感度の形成に関して条件出しを行った。合成条件の変化による結晶品質の変化について評価を行った。

3.2.2 中性不純物準位の可視光感応性評価

中性不純物準位を効率的に評価するため、非破壊でのドーピング濃度評価技術を確立する。

ダイヤモンド中の不純物濃度の非破壊評価法として、X線回折、X線光電子分光法、フー リエ赤外分光光度計(FTIR)、カソードルミネッセンス法およびラマン分光法が用いられ ている。有感度膜の評価に適した非破壊評価法を選定することが重要である。各評価手法 の特徴を表3にまとめる。

手法	分析対象	必要な前処理など
X線回折 (XRD)	結晶格子による回折. 不純物濃度 変化による格子歪みを検出.	なし %オーダーの不純物ドーピングで 結晶歪みの検出が可.
X線光電子分光 (XPS)	X線照射により,試料表面から放 出される光電子の運動エネル ギーを計測.	チャージアップ防止 不純物の検出下限が, %オー ダー
フーリエ赤外分光光度計 (FTIR)	赤外による分子の吸収を測定.	なし 透過測定のため,基板と膜それぞ れで評価が必要.エピ膜付き基板 の評価が難しい.
カソードルミネッセンス法 (CL)	電子線照射により電子と正孔を励 起し, 半導体バンドギャップ中の 発光を伴う再結合過程を解析	チャージアップ防止 ppmオーダーの不純物検出も可 能
ラマン分光法	物質中の分子振動による光の散 乱現象を検出. 歪み, 熱, 不純物 (結晶性) に敏感	なし

表3 ダイヤモンド中の不純物濃度非破壊評価測定例

3.3 研究推進

本研究を推進するにあたり、以下の連携会議を行った。

① キックオフ会議

日時:令和元年11月28日 場所:産業技術総合研究所関西センター C-6棟1F会議室 会議の内容:目標と目標達成に必要な作業の確認、および役割分担について

P0 フォロー会議

日時:令和元年12月7日

場所:原子力安全研究協会

会議の内容:山本 PO および原安協への令和元年度契約に関する研究進捗報告

③ 産総研・北大(JAEA)連携推進会議

日時:令和2年1月19日、1月21日 場所:東京都三鷹市、兵庫県神戸市 会議の内容:エンドユーザーへの聞き取りおよび最終製品までの技術課題検討

P0 との技術討論

日時:令和2年1月20日 場所:山本 PO と今後の研究展開についてご説明および討論

⑤ 廃炉技術情報交換会

日時:令和2年1月29日 場所:産業技術総合研究所つくば中央第二 会議の内容:産総研、広島大学、量研機構の材料およびデバイス技術者と、JAEA 金子博 士および小川徹博士(元 JAEA 廃炉国際共同研究センター長)による今後の廃炉工程およ び必要技術についての情報交換

世界的なコロナウィルスの蔓延による影響で、以下の学会での成果発表が延期となった。

H. Umezawa and S. Ohmagari, 2nd Workshop on Cathodoluminescence and Electron Beam Induced Current of Semiconductor Nanostructures, Grenoble, France, March 16-18, 2020.

> **3.3-1** - 25 -

4. 結言

本業務は福島第一原子力発電所の廃止措置を加速するため、ダイヤモンドを用いた耐放射線性 可視光固体撮像素子を開発することを目的としている。開発目標として、ダイヤモンドトランジ スタで電荷結合素子(CCD)の基本動作となる電荷転送動作をX線積算線量10MGy照射後の動作 が実証されているダイヤモンド MESFET にて確認する。また、ダイヤモンド固体撮像素子が可視 光における感度を得るために、中性不純物準位を用いた革新的ダイヤモンドフォトダイオードを 試作し評価を行う。

以下に、3カ年計画の1年目である本年度の業務実績を述べる。

- (1) ダイヤモンド MESFET の CCD 動作確認と耐放性評価
 - ① 耐放射線 MESFET の作製(産総研)

ダイヤモンド半導体において CCD 動作を確認するために、耐放射線 MESFET を試作した。 MESFET はホウ素ドープ p 型膜上に形成した。合成したダイヤモンド p 型膜に耐放射線性を 有するオーミック電極およびショットキー電極を形成し MESFET とした。

② MES マルチゲートの作製と電荷転送特性の確認(産総研、北海道大学)

MESFET のマルチゲート化が可能であるかを評価するため、プロセステストを行った。マ ルチゲートアレイの作製方法について、各種プロセスを試みた。シミュレーションにより ゲート長およびゲート間隔に対して電荷損失を評価した。

- ③ MOS ダイオードの試作と耐放性評価(産総研、北海道大学) ダイヤモンド MOS ダイオードを試作した。電極には耐放性が実証されている Ru を用い
 - た。ダイヤモンド MOS ダイオードに対して電気特性および容量特性を評価した。
- (2) ダイヤモンド有感層の開発と評価
 - ① NおよびPドープダイヤの不純物高濃度化(産総研) ダイヤモンド有感層の形成における条件出しを行った。合成条件の変化による結晶品質 の変化について評価を行った。
 - ② 中性不純物準位の可視光感応性評価(産総研) 中性不純物準位を効率的に評価するため、非破壊でのドーピング濃度評価技術を確立した。
- (3) 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。

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。

参考文献

- N. Tranchant, M. Nesladek, D. Tromson, Z. Remes, A. Bogdan, P. Bergonzo, Time of flight study of high performance CVD diamond detector devices, Phys. Stat. Sol. A, 204 (2007) 3023-3029.
- (2) M. Liao, Y. Koide, High-performance metal-semiconductor-metal deep-ultraviolet photodetectors based on homoepitaxial diamond thin film, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 87-90, doi:10.1063/1.2349829.
- (3) J. Barjon, T. Tillocher, N. Habka, O. Brinza, J. Achard, R. Issaoui, F. Silva, C. Mer, P. Bergonzo, Boron acceptor concentration in diamond from excitonic recombination intensities, Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys. 83 (2011) 1-4, doi:10.1103/PhysRevB.83.073201.
- (4) H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno, Effects of intentionally introduced nitrogen and substrate temperature on growth of diamond bulk single crystals, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 01AC07, doi:10.7567/JJAP.55.01AC07.

This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	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	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	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				
AI 立長 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 さ , 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 ⁸			
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	1			
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	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

	SI租立单位			
組立量	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 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,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	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	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,	ガレイ	Gv	J/kg	m ² e ⁻²
カーマ		Gy	ong	
線量当量,周辺線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 e^{-2}$
方向性線量当量,個人線量当量		50	5/Kg	III 8
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	SI 組立単位		
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	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
酵素活性濃度	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}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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	۰	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, 1	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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原	子質量単	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	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)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 帰	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	ユ	IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			k	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	x	N	111		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートルヌ	系カラ:	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進っ	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П	IJ	Į	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ		~		$1 = 1 = 10^{-6} m$