

平成28年度 原子力システム研究開発事業
「安全基盤技術研究開発 タイプA」

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

研究代表者: **金子 純一**

参画機関:

北海道大学、産業技術総合研究所、日立製作所、物質・材料研究機構



事業概要

本研究開発事業においては、原子炉用耐放射線・高温動作計測システム開発の第一段階として、高速炉、軽水炉で使用可能なダイヤモンド γ 線検出器とダイヤモンドFET(Field Effect Transistor: 電界効果トランジスタ)をもちいた前置増幅器からなるCAMS(Containment Atmospheric Monitoring System: 原子炉格納容器内雰囲気モニタ)のプロトタイプの開発を目指す。

開発目標として過酷事故対応で求められる、耐熱温度:230°C以上、積算線量:5MGy以上の達成を目指す。努力目標として可能な限り動作温度:300°Cに近づくことを目指す。

また圧力容器内を除く原子炉格納容器内での使用を念頭に、動作温度:500°C、積算線量:10MGyを満たす電子デバイス実現の要となるダイヤモンドIC(Integrated Circuit: 集積回路)等の要素技術開発としてダイヤモンド基板上へのキャパシタ、抵抗製作技術等を開発する。また回路製作で必要となる500°C対応、抵抗、キャパシタ、パッケージ等の開発も行う。

過酷事故対応 要求性能例

○水高速炉(RBWR)、軽水炉

1. エリアモニター

動作上限温度: 100°C

2. CAMS(確定値)

動作上限温度: 230°C (最初の3時間、以降 200°C 。短期目標)
 300°C (長期目標)

許容線量: 5MGy 、72時間

測定レンジ: $10^{-2}\text{Sv/h} \sim 10^5\text{Sv/h}$

プリアンプ部(電子回路)



検出素子部

原子炉建屋用エリアモニタ
(検出器部にシリコン半導体検出器を使用) BWR、PWR

○ナトリウム冷却高速炉(予測値)

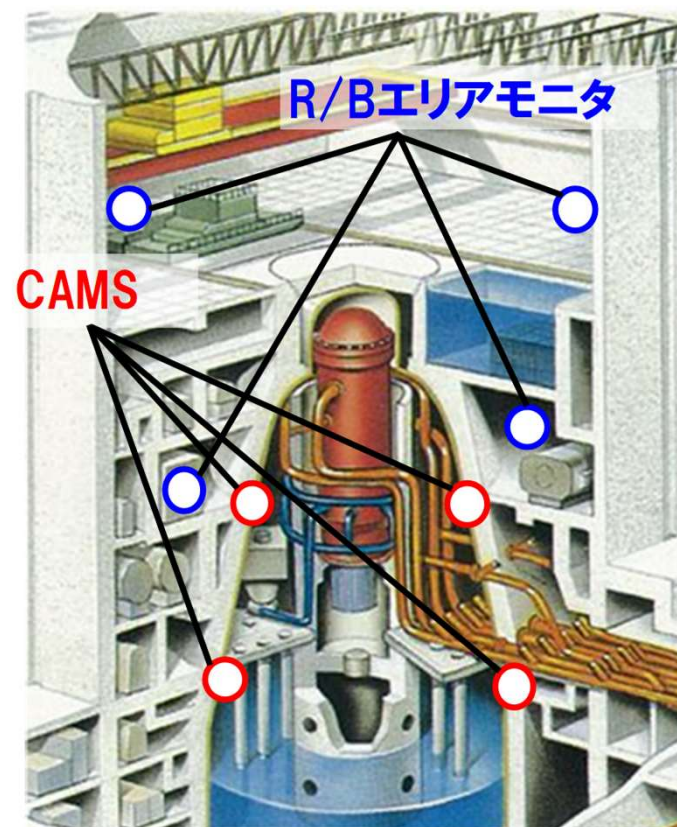
1. 一次冷却系プロセス計装用電子回路

動作上限温度: 300°C

2. 核計装用前置増幅器

動作上限温度: 500°C^*

耐熱温度: 650°C^*



* 中性子検出器の上限動作・耐熱温度から金子が仮定

原子力応用におけるダイヤモンド半導体の優位性

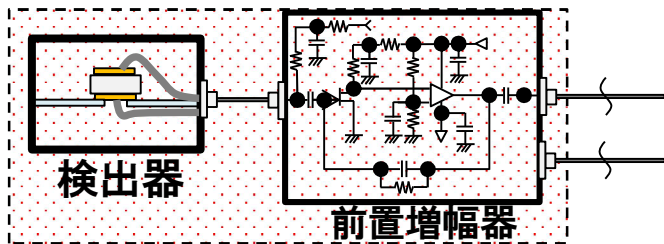
材料	禁制帯幅	安定動作 可能温度	耐放射線性能	
			γ線	中性子
ダイヤモンド	5.5 eV	> 500°C	◎	◎
SiC (4H)	3.25 eV	300°C	○	×
GaN	3.4 eV	300°C	△	△
Si	1.1eV	~50°C*	×	×

*SOI(Si on insulator)は200°C付近まで可)

Si系は $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si}$ ($T_{1/2}=2.7\text{h}$, β^-) \rightarrow ^{31}P 反応があり、中性子照射により半導体特性が変わるがダイヤモンドは相当する反応無し。唯一の問題はp型ダイヤモンドの $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応。

集積化はSiCがリード。しかし、耐放射線性能の低いMOS技術ベースでありアドバンテージ無し。SiCと同じ物を作ればダイヤモンドが圧倒的に高性能・高信頼性 !!

原子炉用ダイヤモンド半導体機器の実用化に向けて



ダイヤモンド
CAMSのイメージ

原子力用 For Nuclear



耐放射線モジュール
Radiation Hardened Module

次期事業(3~4年)

ダイヤモンドマルチプレクサ、PAM等
ダイヤモンドICを使用した原子炉用
ダイヤモンド半導体機器開発

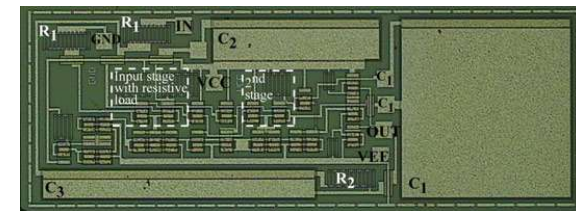
本事業(H28-31年)

- I. 原子炉格納容器雰囲気モニタのプロトタイプ開発
 - ①簡易エネルギー弁別ダイヤモンド γ 線検出器の開発
 - ②ダイヤモンドMESFETの改良と生産
 - ③ダイヤモンド前置増幅器の開発
- II. 原子力用ダイヤモンドICの要素技術開発
 - ①ダイヤモンドICの開発
 - ②ダイヤモンドMIMSFETの耐放射線性能向上
 - ③ ^{11}B ドーピング型ダイヤモンド合成技術の改良

前事業(H24-27)

- ・ダイヤモンド半導体の耐放射線性研究(水素エネルギー)
- ・ γ 線用ダイヤモンド検出器の開発
- ・原子力用ダイヤモンドICの開発
- ・CAMSの検討

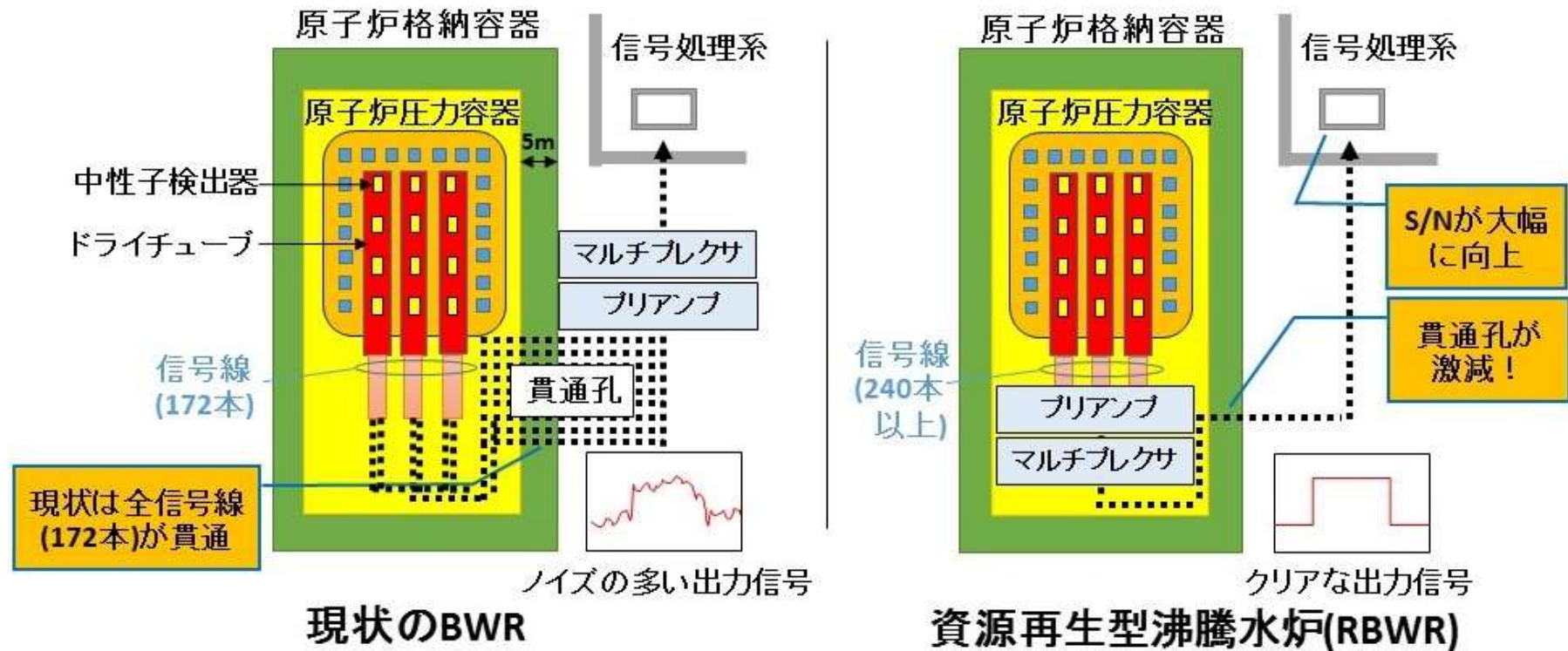
目標達成



ダイヤモンドICのイメージ*

*R. Hedayati et al, IEEE Electron Device Letters, vol35, p693, 2014

最終目的:ダイヤモンド半導体による原子炉計装の革新

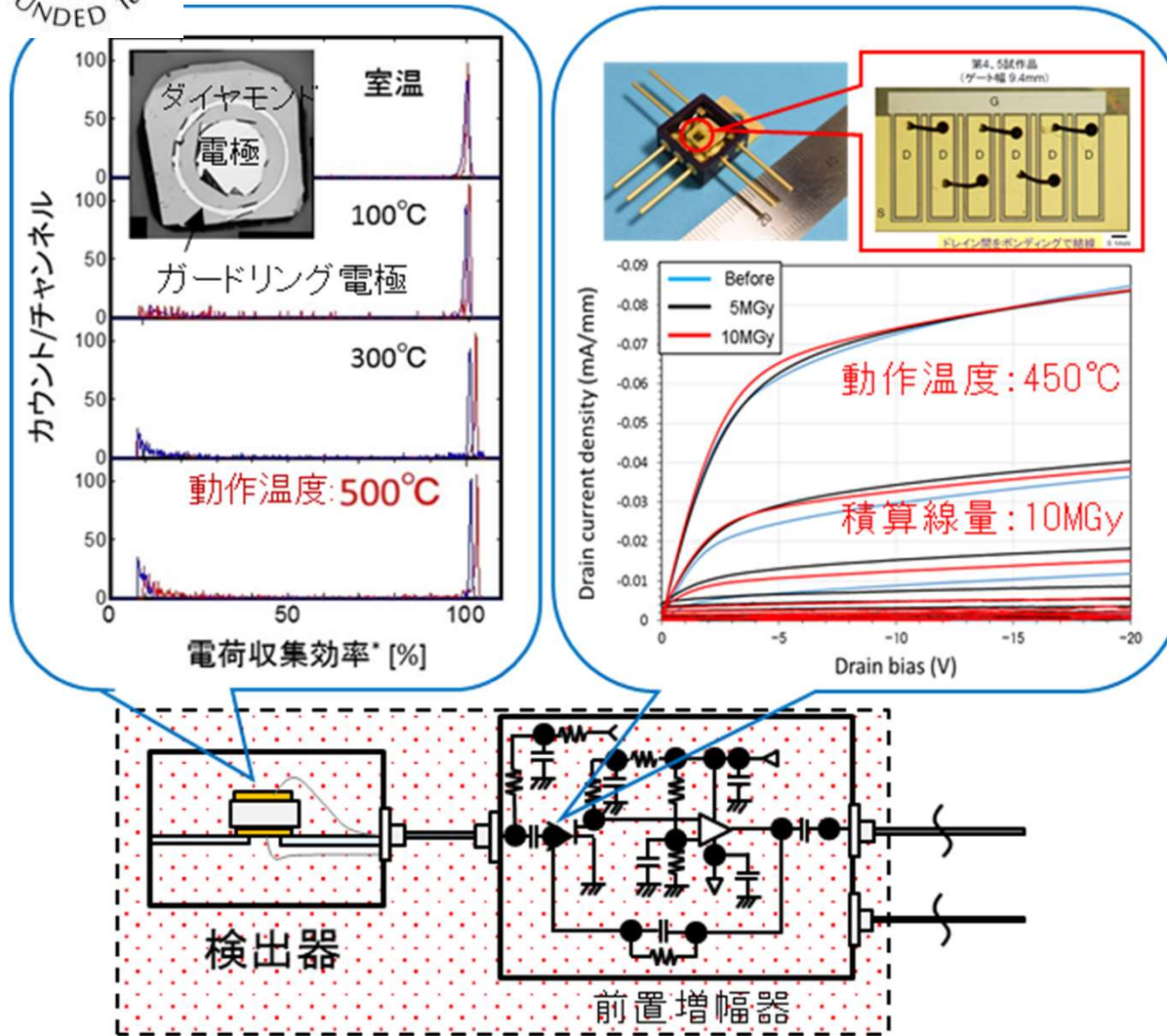


FBR、PWRも前置増幅器とマルチプレクサによる電気ペネトレーション削減は同様の効果あり

ダイヤモンド半導体デバイス使用機器	効用
○エリアモニタ (PWR、BWR、RBWR、FBR)	耐熱化と小型化
○起動、広領域モニタ用前置増幅器(FBR、PWR)	S/N比改善による信頼性の向上
○格納容器内雰囲気モニタ(γ 線計測)(RBWR,BWR)	耐熱化、小型化と多チャンネル化
原子炉格納容器内設置型マルチプレクサ(全て)	原子炉格納容器電気ペネトレーションの大幅削減
事故後監視計(PWR)	長寿命化による交換・維持コストの大幅低減

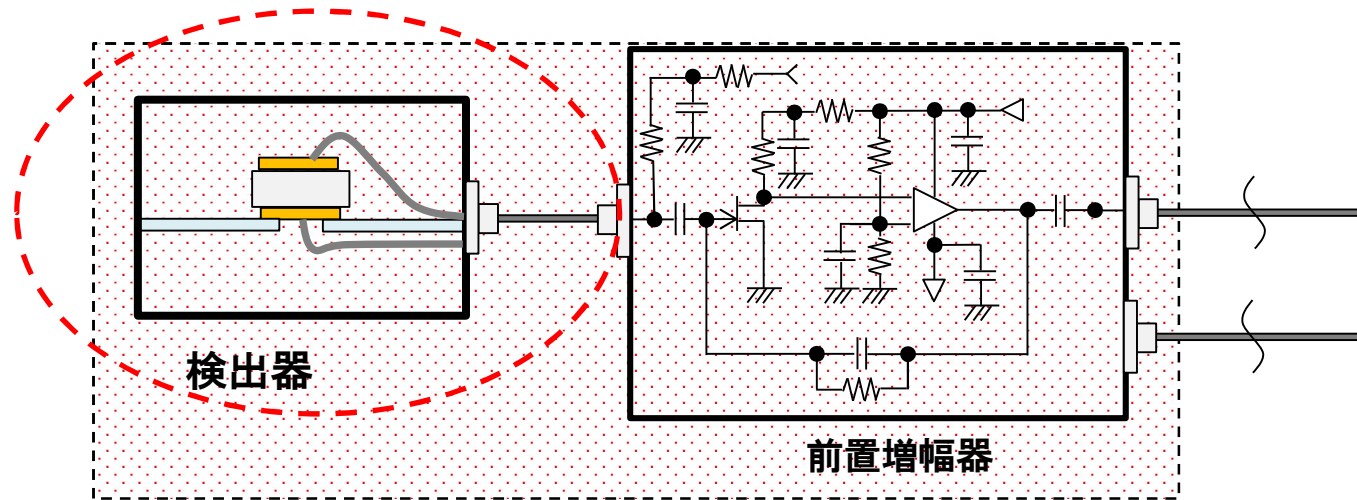
○本開発事業が適用対象として想定する機器

CAMSのイメージと H24年度原子カシシステム研究開発の成果

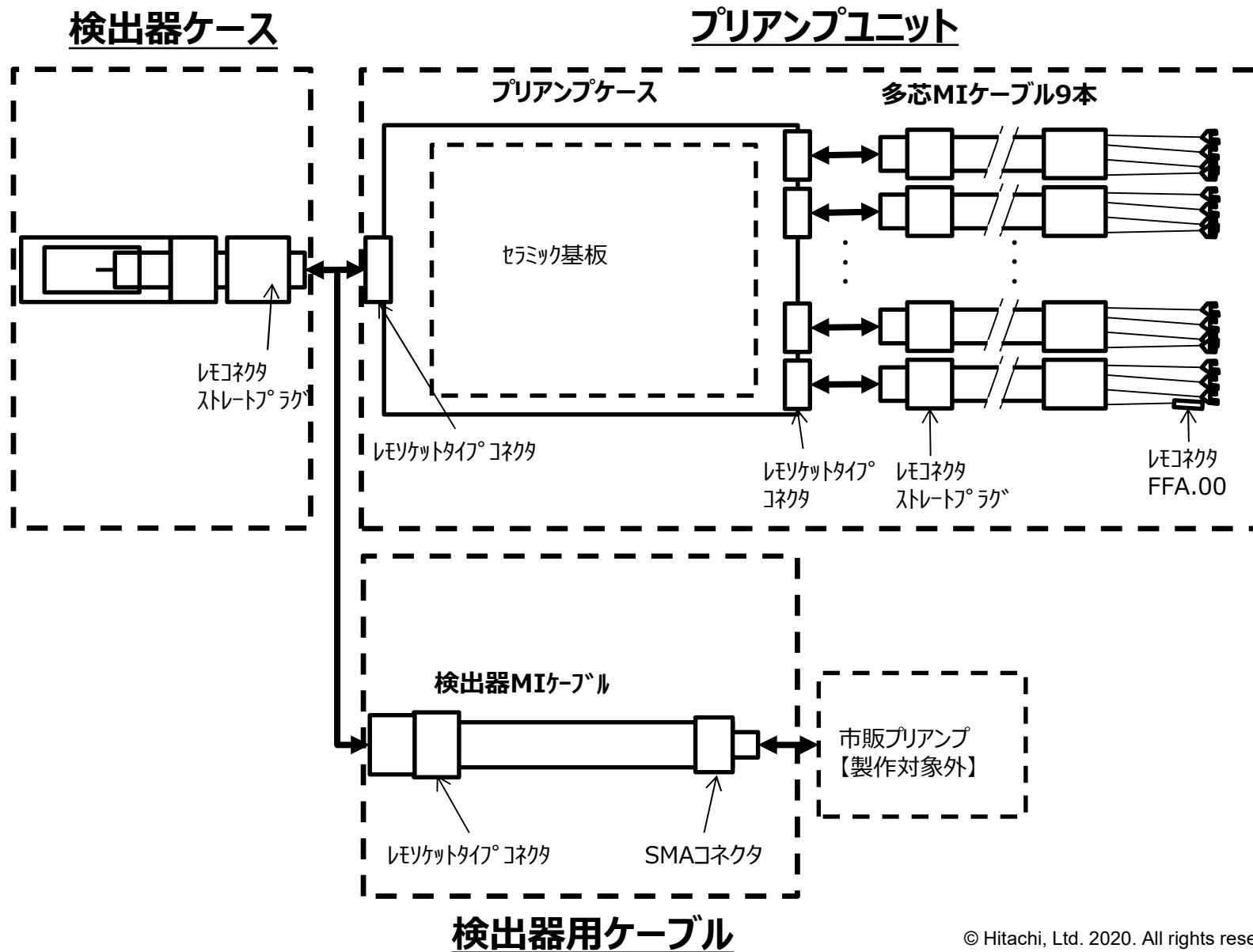


予測される困難:
優れた性能を持つダイヤモンドFETを1個手作業で行うことは出来た。しかし、前置増幅器を作るためには20個弱の同一性能のダイヤモンドFETを作る必要あり。

ダイヤモンド γ 線検出器の開発



HITACHI
Inspire the Next

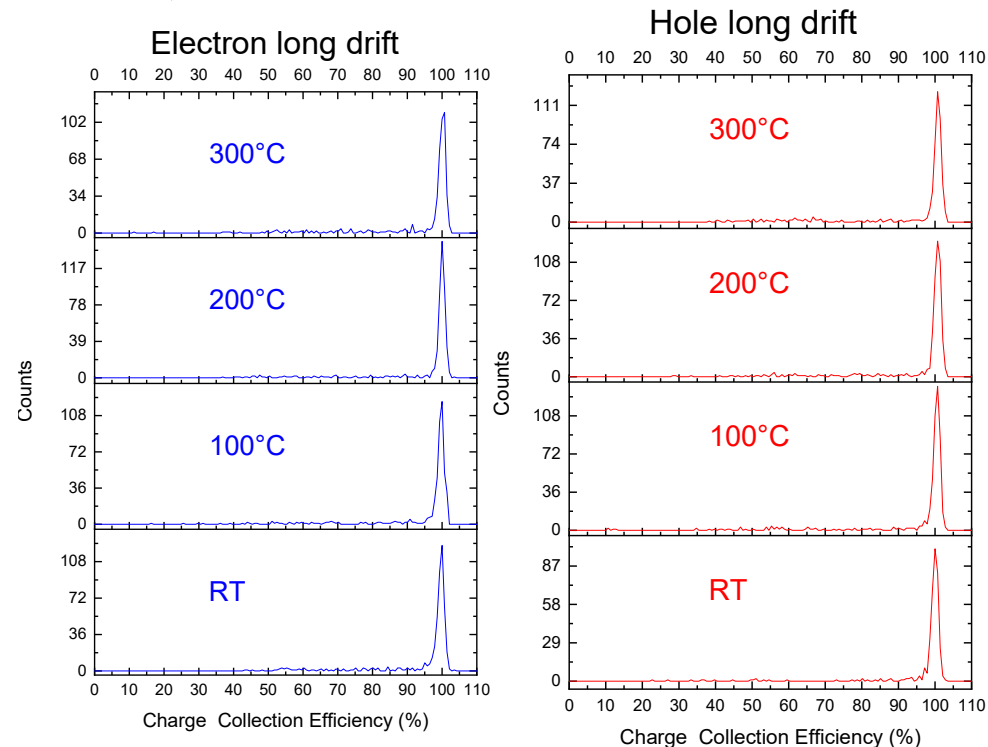


大型基板を用いた検出器作製プロセスの改善

- 簡易エネルギー測定を行うため、 $300\mu\text{m}$ 程度の結晶厚さが必要
- ⇒ 大型単結晶自立膜の合成、切り出しにより、試料毎の合成条件、成長厚さや特性のばらつきを改善



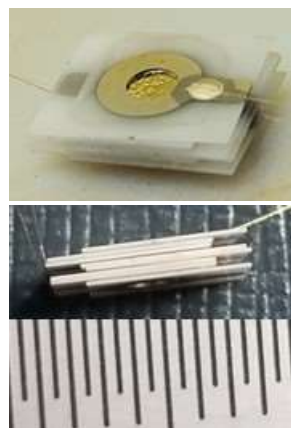
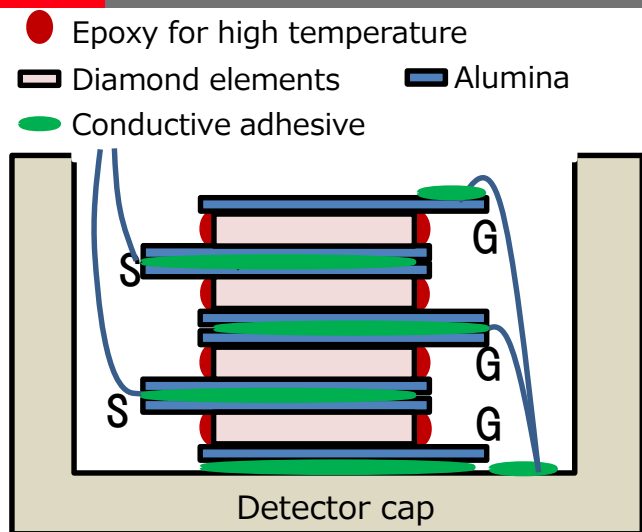
9mm角ダイヤモンド単結晶基板上に合成し、レーザー切断した後の試料。右の測定例は赤枠部分の試料から製作した検出素子による。レーザー顕微鏡写真10倍



真空、RT~300°Cの高温環境下での α 線誘導電荷量分布測定結果

レーザー切断の影響は無く、それぞれ300°Cでの動作を確認

ダイヤモンド検出器【積層素子】

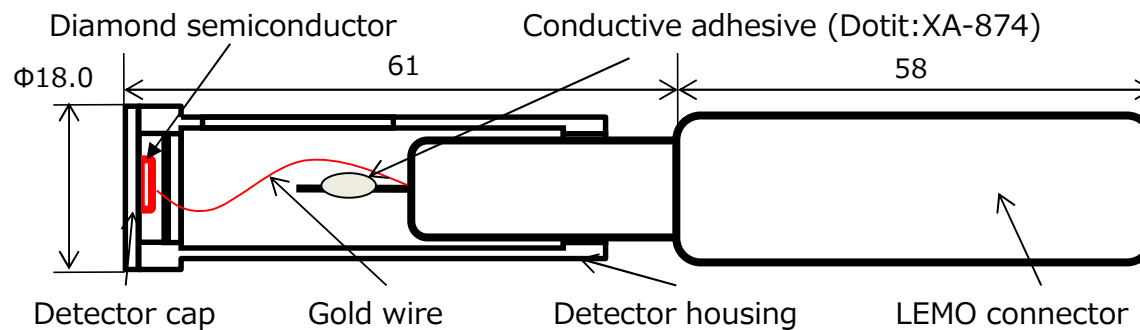


a) 4 layer diamond elements



b) Diamond detector on the detector cap

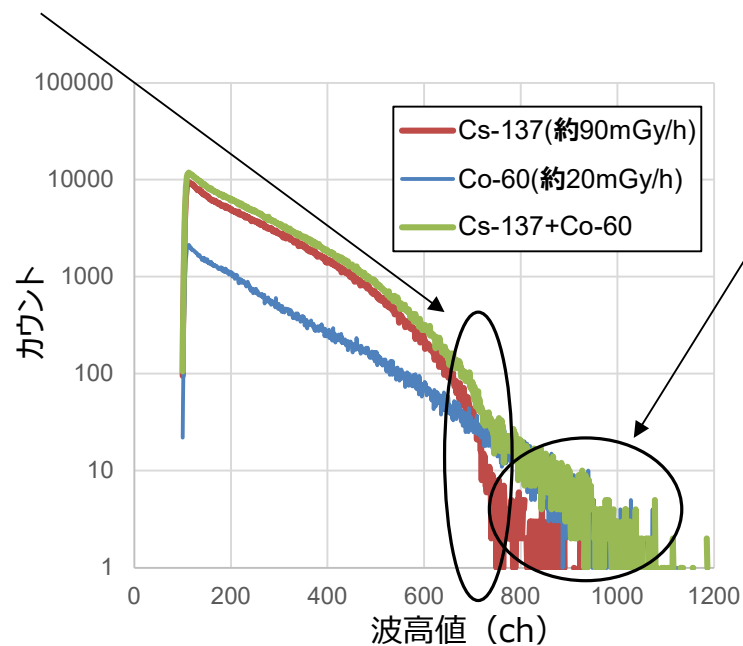
改良積層構造及び積層素子写真



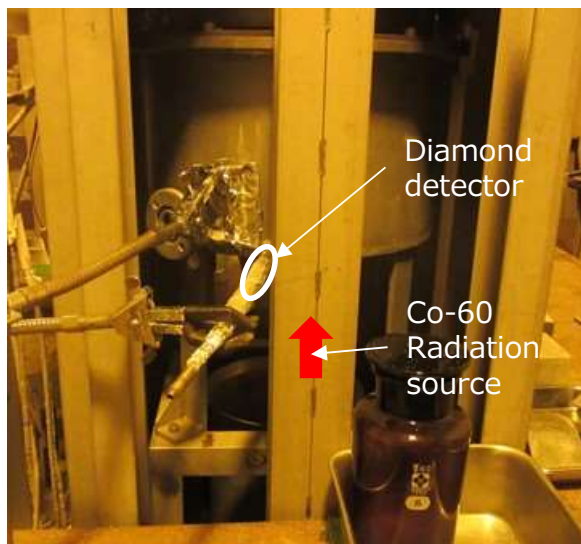
ダイヤモンド検出器の構造図及び写真

700ch (0.5MeV) 近辺の
コンプトンエッジの有無により、
 ^{137}Cs の有無の判定可能

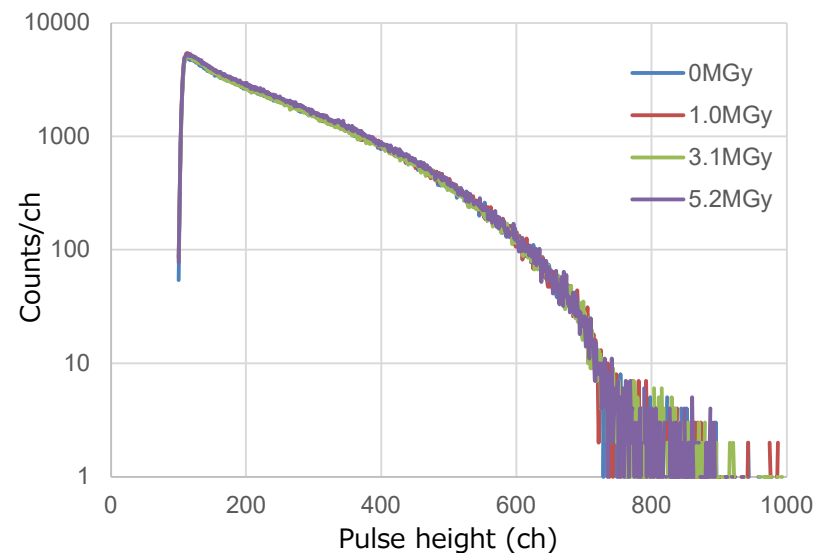
コンプトンエッジよりも高エネルギー側のカウントの有無により、
 ^{60}Co の有無の判定可能



簡易核種弁別手法の評価結果



照射試験体系



波高値スペクトルの積算線量依存性

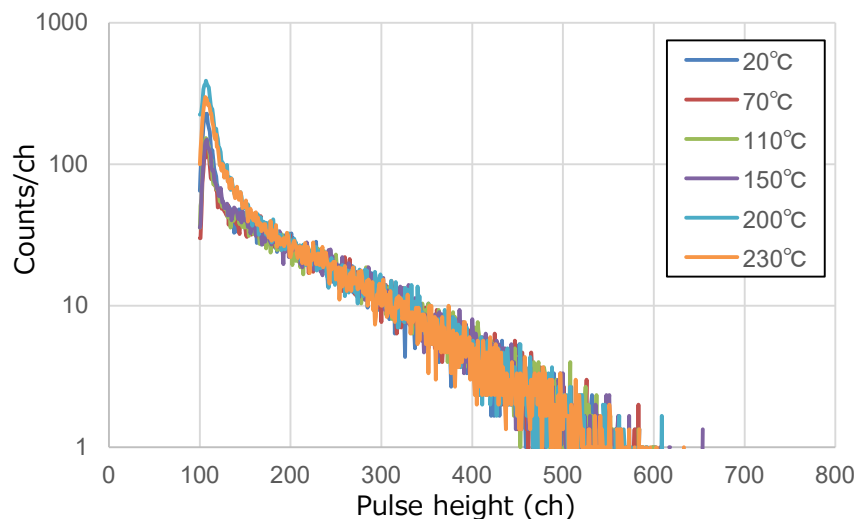
積算線量5.2MGyまで

波高値スペクトルに大きな変動無し

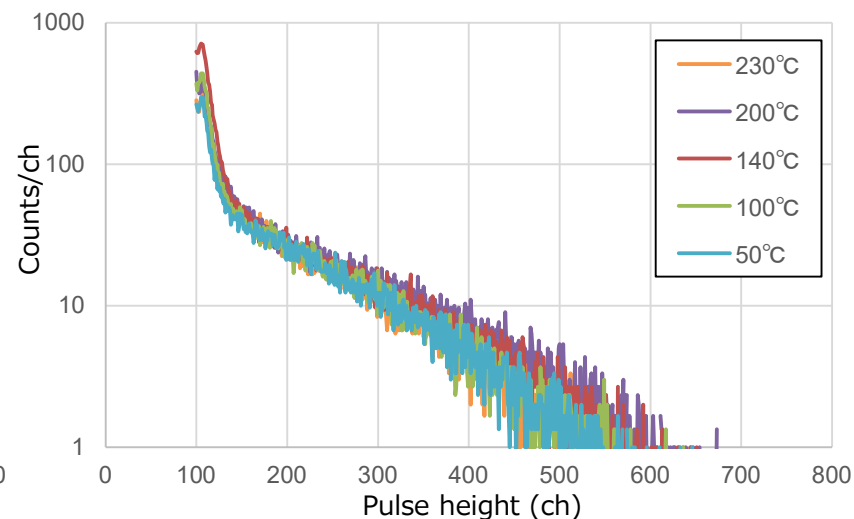


積算線量5MGy以上で正常動作を確認

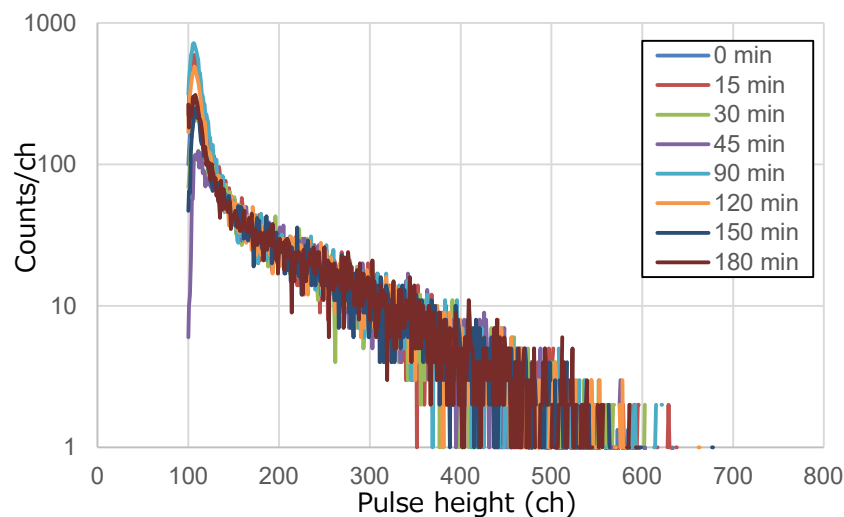
5MGy照射後のダイヤモンド検出器で耐熱試験（230℃3時間）を実施



a) 温度上昇時（3分間測定）



b) 温度下降時（3分間測定）



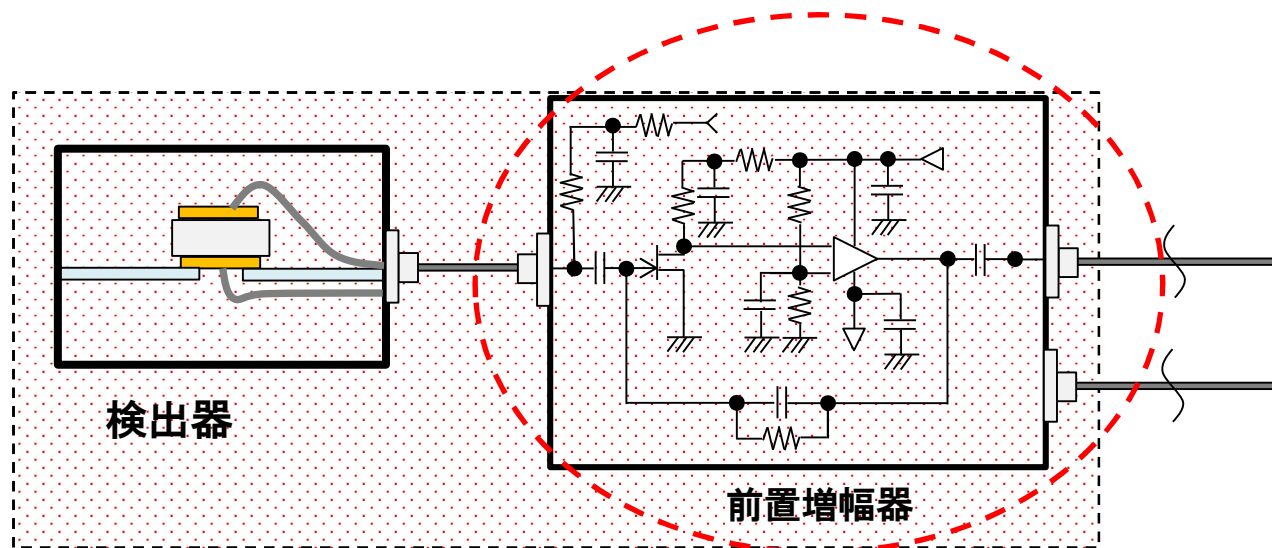
c) 230℃3時間保持時（1分間測定）

- ・温度上昇時、下降時及び
230℃保持中（3時間）において、
波高値スペクトルに大きな変動無し。



5MGy、230℃で正常動作を確認

ダイヤモンドFETと前置増幅器の開発



	MESFET	MISFET/MOSFET
構造	<p>絶縁膜 ソース ゲート ドレイン コンタクト層 空乏層 コンタクト層 p型CVD領域 半絶縁性ダイヤモンド</p>	<p>絶縁膜 ソース ゲート ドレイン コンタクト層 コンタクト層 n型CVD領域 半絶縁性ダイヤモンド</p>
動作原理	ゲートから半導体中に空乏層を伸ばすことで、キャリアを減少させ、電気伝導を制御	ゲートで半導体中にキャリアを発生させることで、電気伝導を制御
長所	開発要素が少ない(短期開発可能) 高い耐放射線性 完全ユニポーラ(pn接合なし)	ノーマリオフ化が可能 (ゲート破壊時に開放) 高温でも高いゲート絶縁性 縦型も可能
短所	基本的にノーマリオン (ゲート破壊時に短絡) 高温でゲートもれ電流増加	MIS/MOS界面準位低下技術が必要 高品質pn接合、pn埋め込み技術が必要 表面ラフネス、ドーピング高精度制御必要 信頼性評価が必要

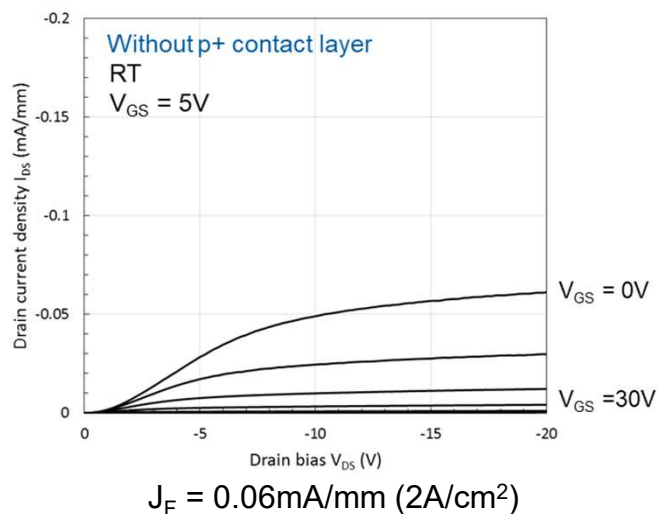
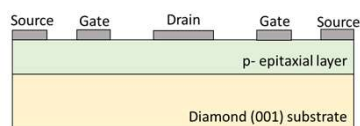
産総研が開発

物材機構が開発

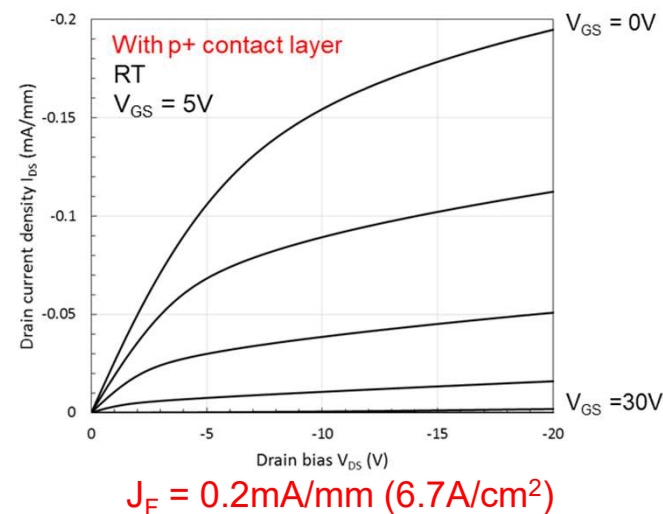
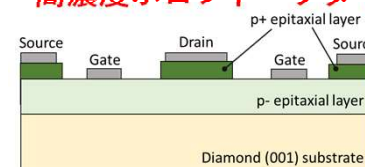
① ダイヤモンドMESFETの開発： 改良2. コンタクト抵抗低減

ソース・ドレイン電極部に高濃度ボロンドープダイヤモンド層を導入
 最大ドレイン電流 & 増幅性能が+200%改善

◆ 旧型： 高濃度ボロンドープダイヤモンド層なし



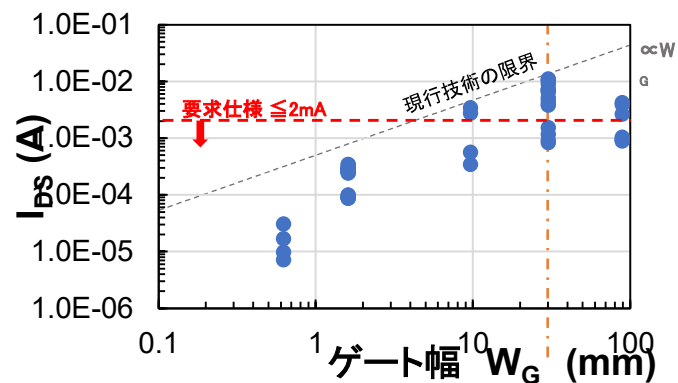
◆ 改良型： 高濃度ボロンドープダイヤモンド層あり



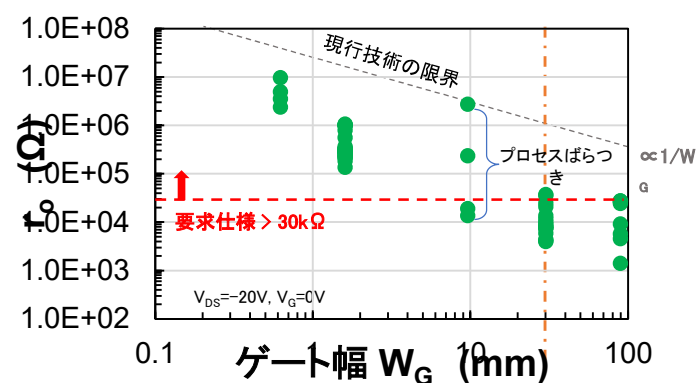
H. Kawashima et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, SBBD17 (2019)

(2) ダイヤモンドMESFET作製技術の確立とダイヤモンドICの要素技術開発 (産総研担当)

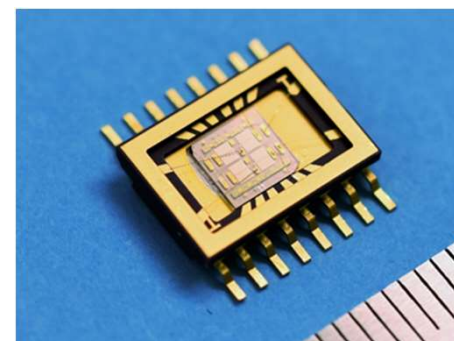
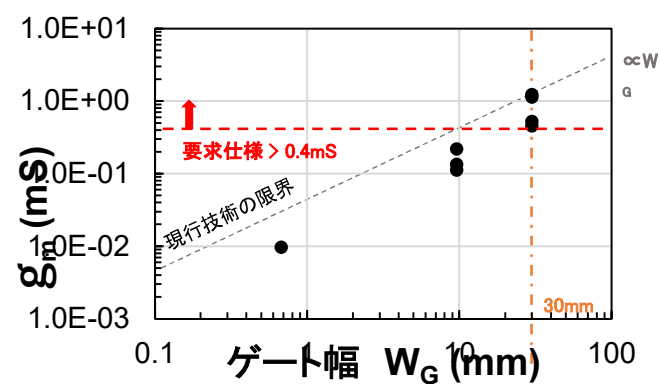
① 最大ドレイン電流



② 出力抵抗

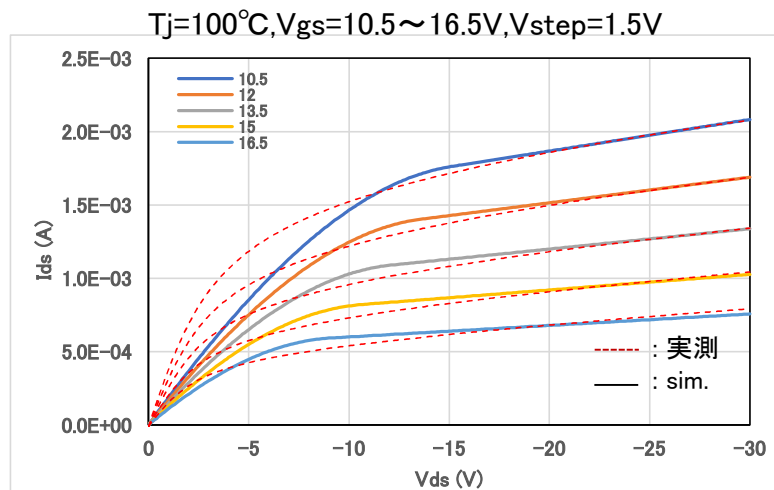


③ 相互コンダクタンス

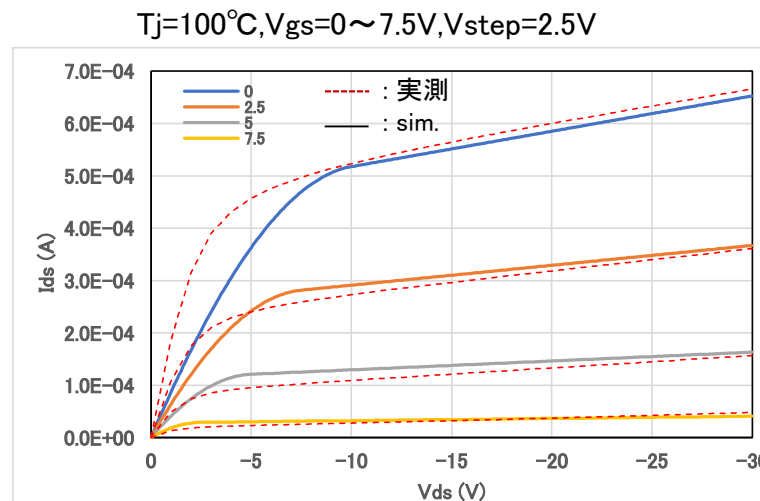


前置増幅器【FET特性(実測とシミュレーションの比較)】

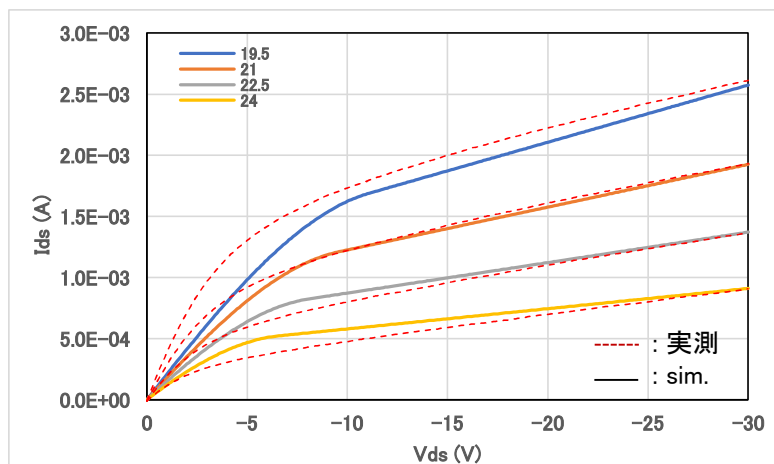
サンプル:19304-01-6_B



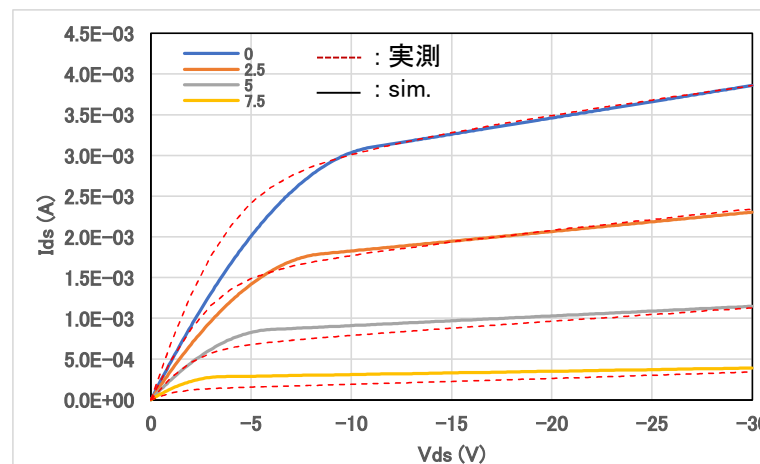
サンプル:19304-01-2_B



$T_j=200^\circ\text{C}, V_{gs}=19.5\sim 24\text{V}, V_{step}=1.5\text{V}$



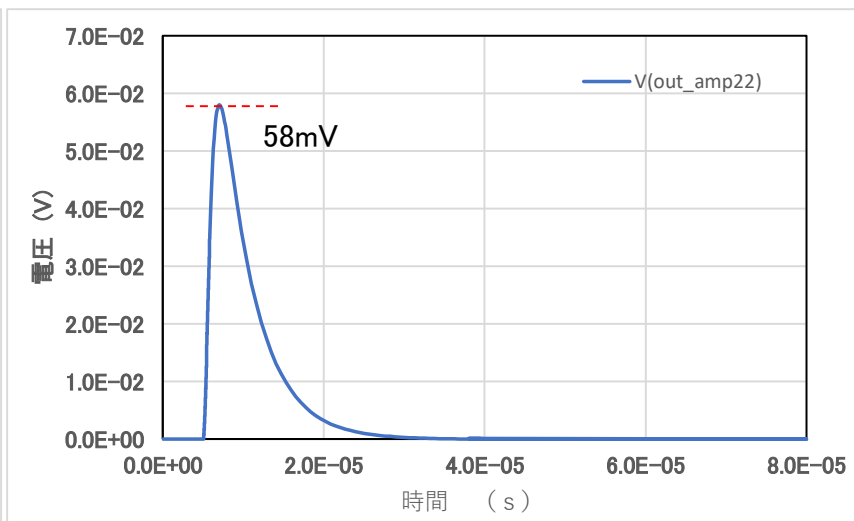
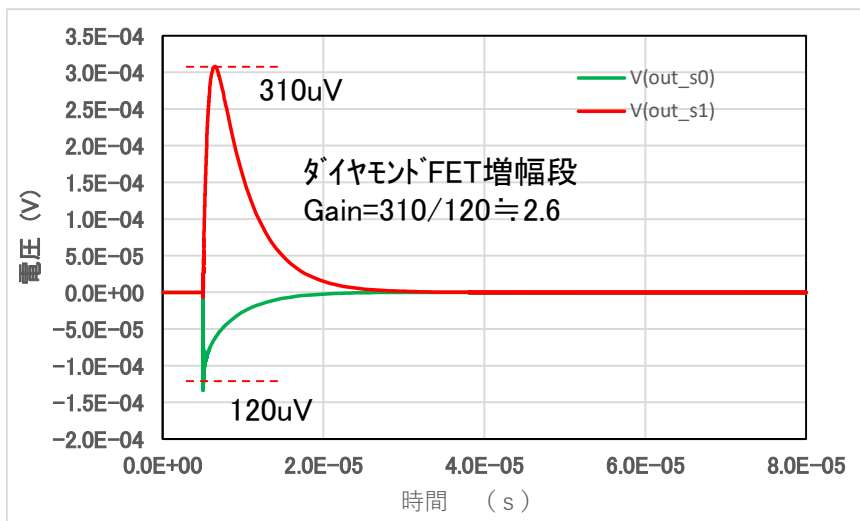
$T_j=230^\circ\text{C}, V_{gs}=0\sim 7.5\text{V}, V_{step}=2.5\text{V}$



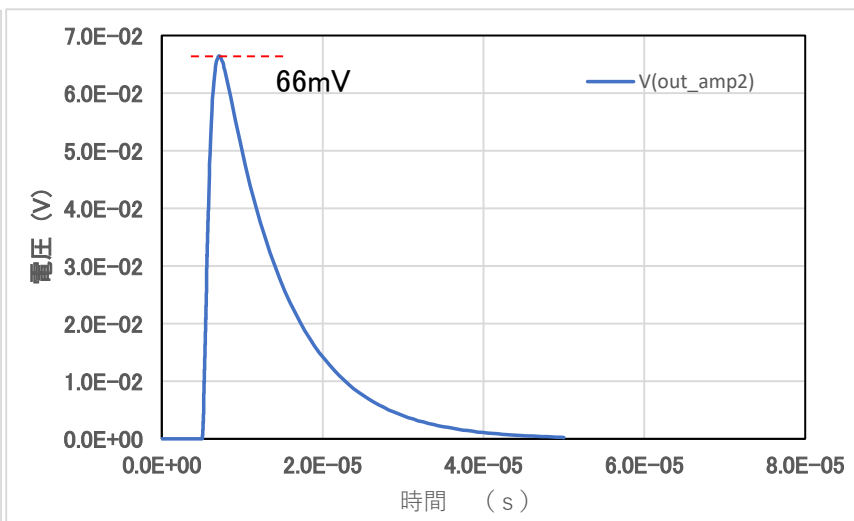
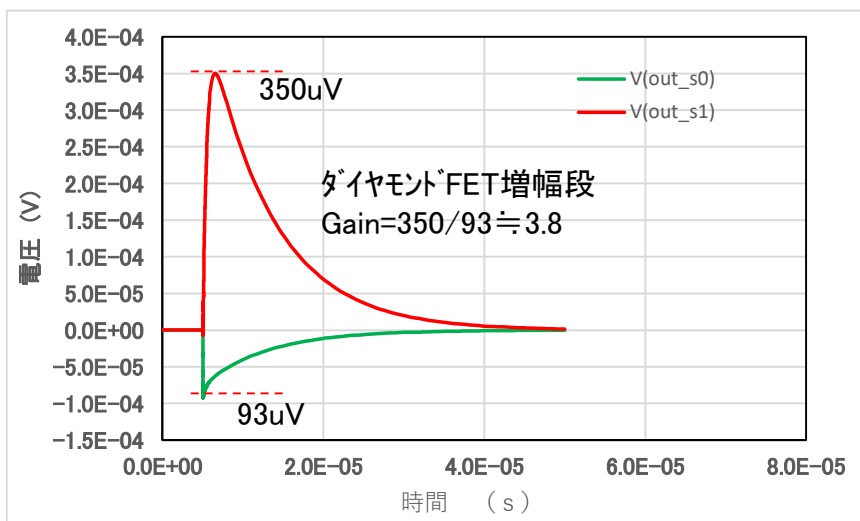
使用電圧域 (15V以上) で実測とシミュレーションがほぼ一致

前置増幅器【シミュレーション結果】

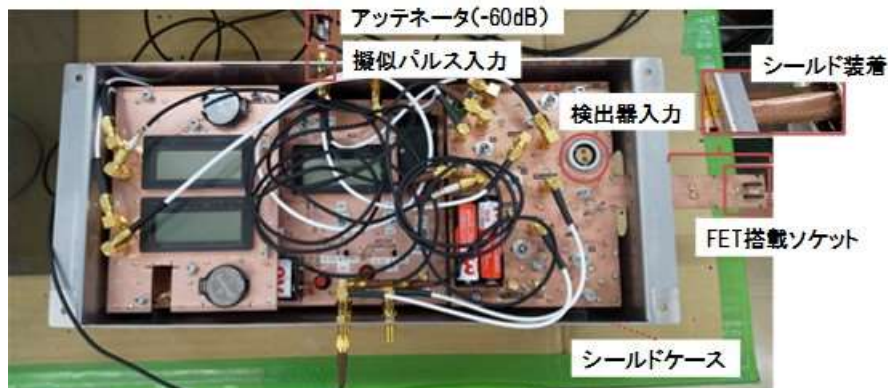
T=100°C



T=200°C

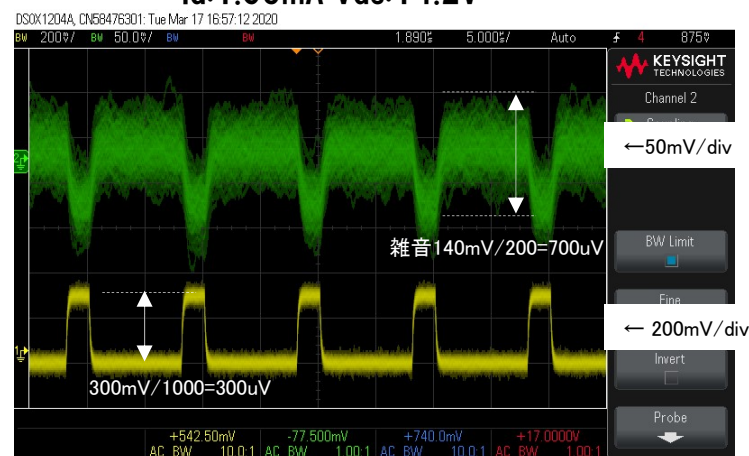


前置増幅器【疑似パルス特性】



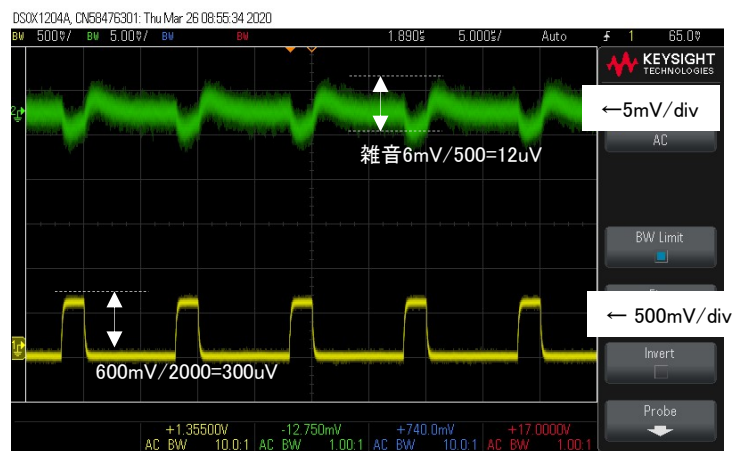
温度条件: 100°C

電源条件: VG:9.0V IG1:4uA、VCC:-69.3V
Id:1.09mA Vds:14.2V



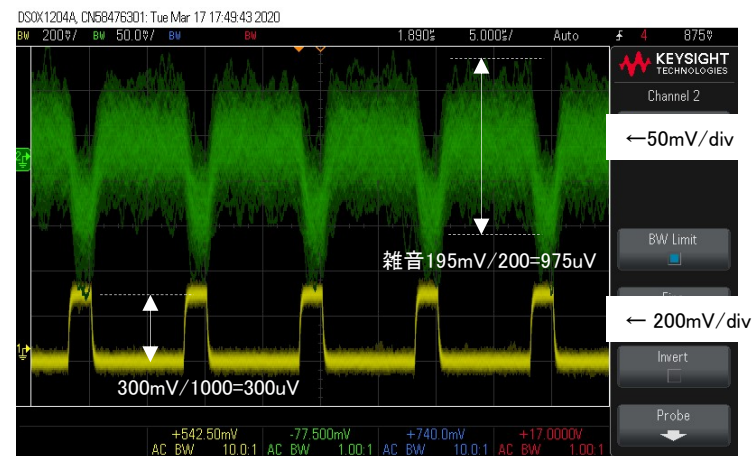
温度条件: 27°C

電源条件: VG:6.1V IG1:2.0uA、VCC:-28.3V
Id:-0.1mA Vds:21.5V



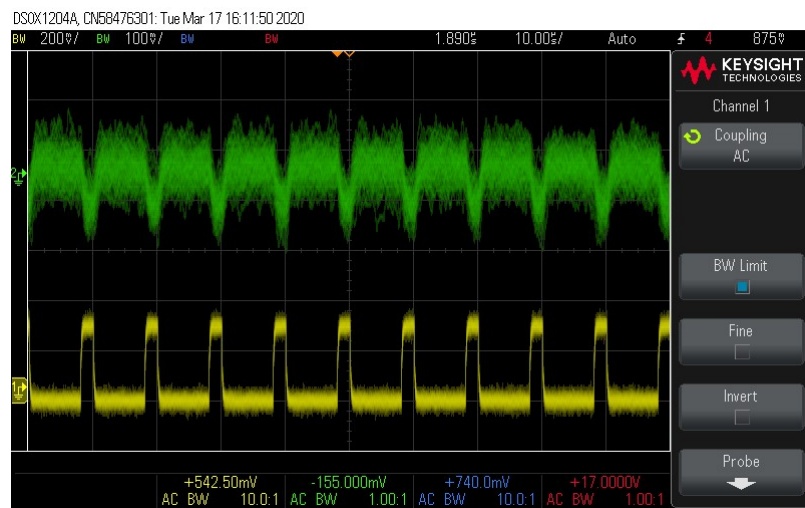
温度条件: 230°C

電源条件: VG:24.1V IG1:186.3uA、VCC:-69.3V
Id:1.19mA Vds:12.9V



前置増幅器【疑似パルス特性（平均化）】

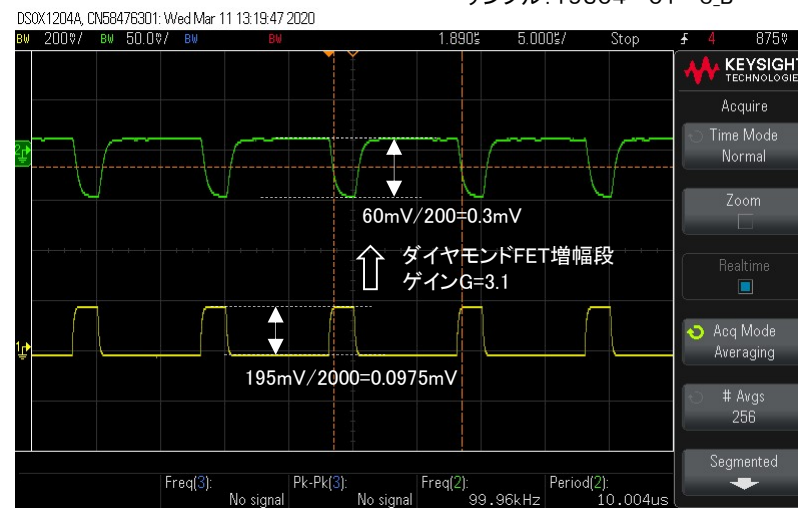
T_j=100°C VG:10.7V IG1:4.7uA、VCC:-69.5V Id:0.97mA Vds:18.9V



< 平均化なし >

T_j= 95°C VG:8.8V IG1:4.1uA、VCC:-63.7V Id:0.86mA Vds:21.4V

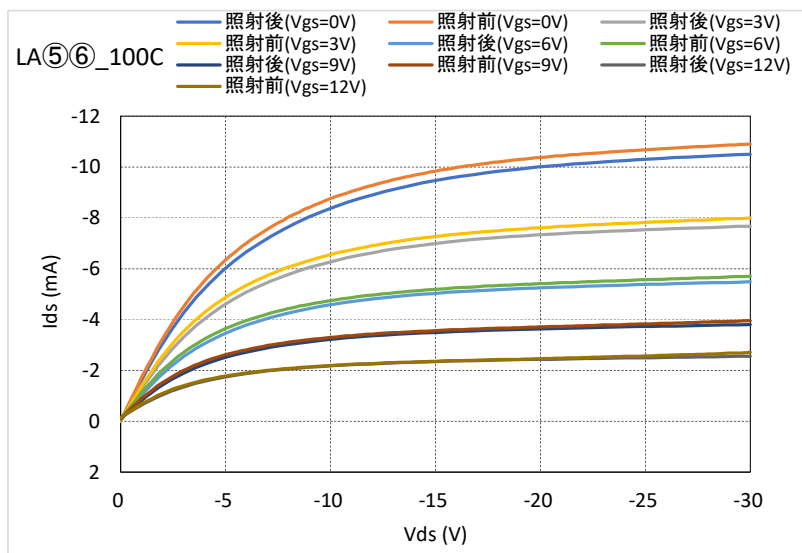
サンプル: 19304-01-6_B



< 平均化(256回) >

ダイヤモンドFETによるチャージアンプは、ランダム雑音は多いが、
ダイヤモンドFET段はシミュレーションと同等の増幅動作(ゲイン:3倍)している

前置増幅器【耐放射線性、耐熱性】



5MGy照射前後のダイヤモンドFET電流・電圧特性

積算線量5MGyまで

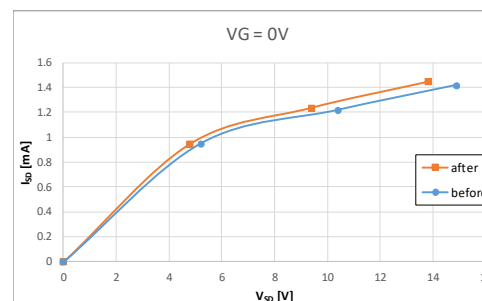
電流電圧特性に大きな変化無し



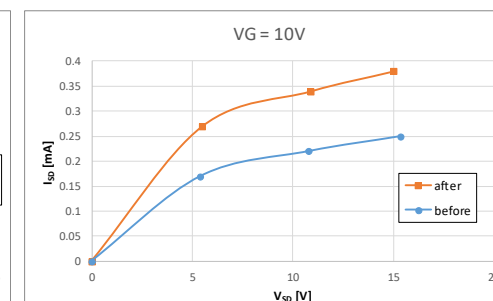
積算線量5MGyで正常動作を確認



5MGy照射後のダイヤモンドFET搭載基板にて、200℃48時間試験実施



・V_{GS}=0Vでの電流・電圧特性比較



・V_{GS}=10Vでの電流・電圧特性比較

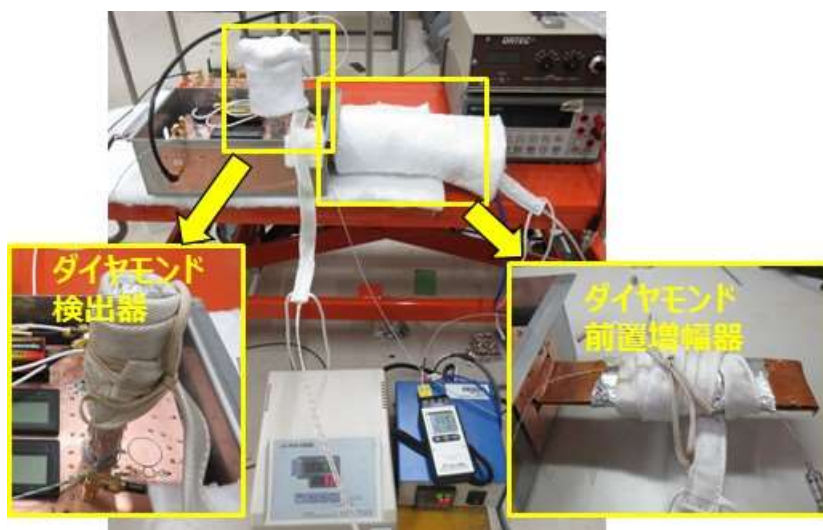
耐熱試験前後のダイヤモンドFET電流・電圧特性

VGS = 0Vで変化小、VGS = 10Vで電流増加

出力抵抗の変化は少なくバイアス電圧で特性調整可能



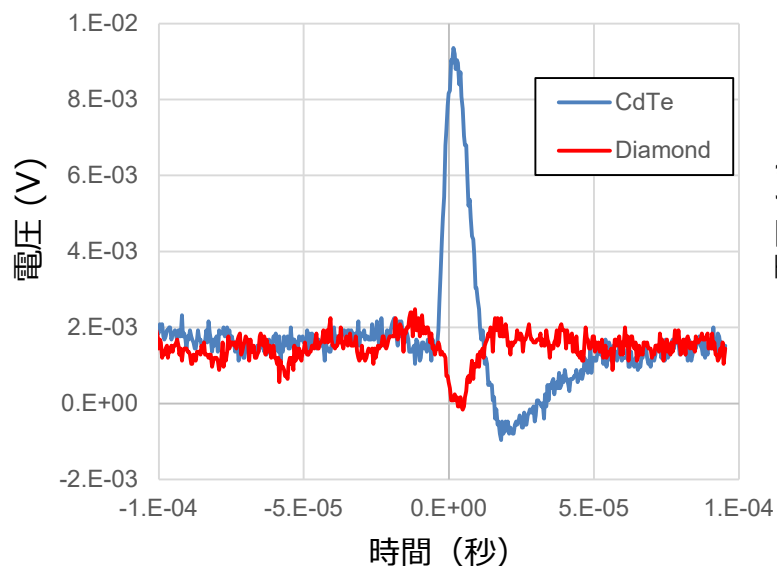
5MGy、230℃で動作可能なことを確認



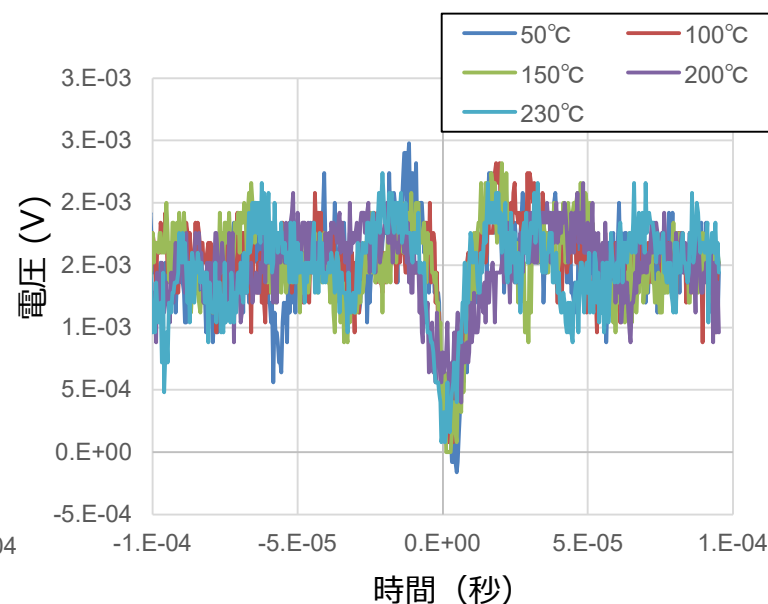
- ・耐放射線試験 (5MGy) 及び耐熱試験 (200°C48時間) 後のダイヤモンド検出器及びダイヤモンド前置増幅器を結合。
- ・230°Cまでの範囲でγ線 (Co-60) 検出能力を検討。



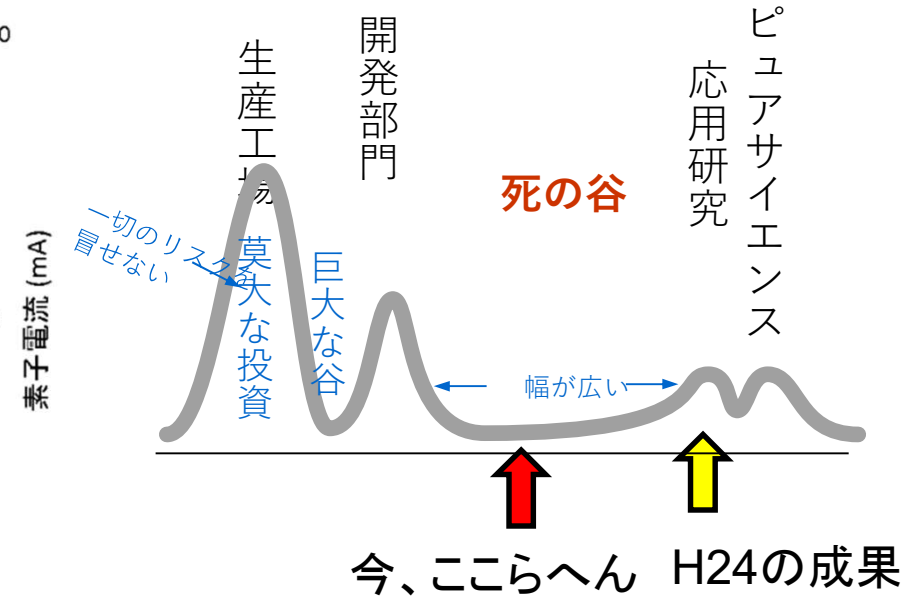
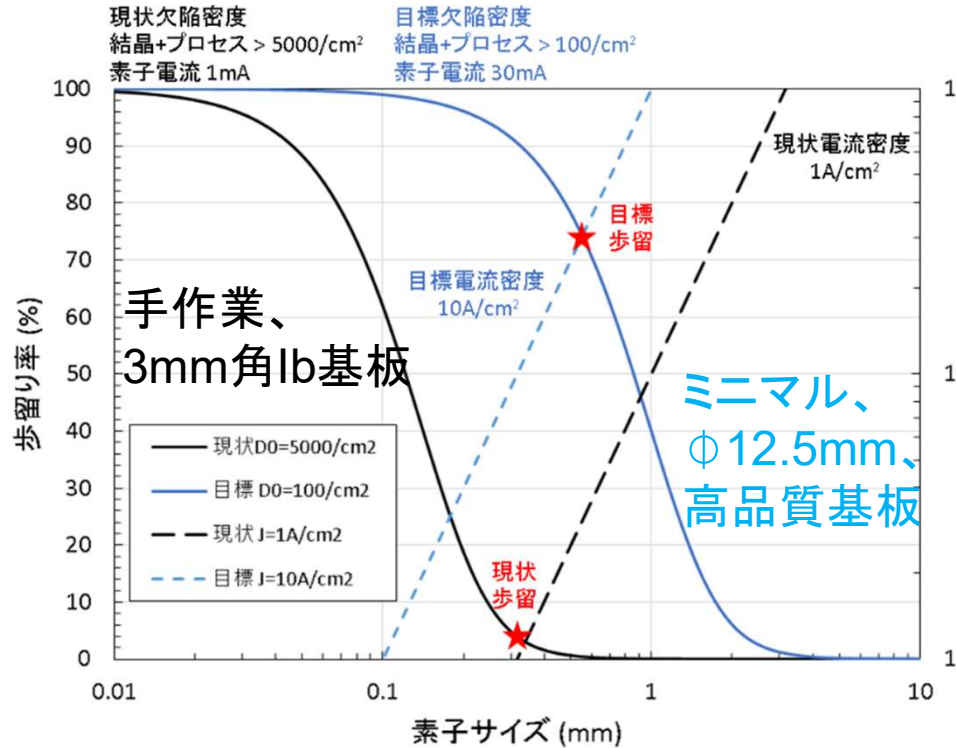
5MGy、230°Cでγ線検出可能なことを確認



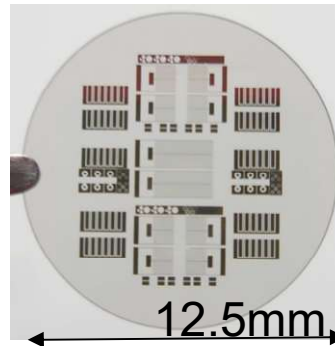
a) ダイヤモンド検出器及びCdTe検出器出力波形 (20°C)



b) ダイヤモンド検出器出力波形の温度依存性

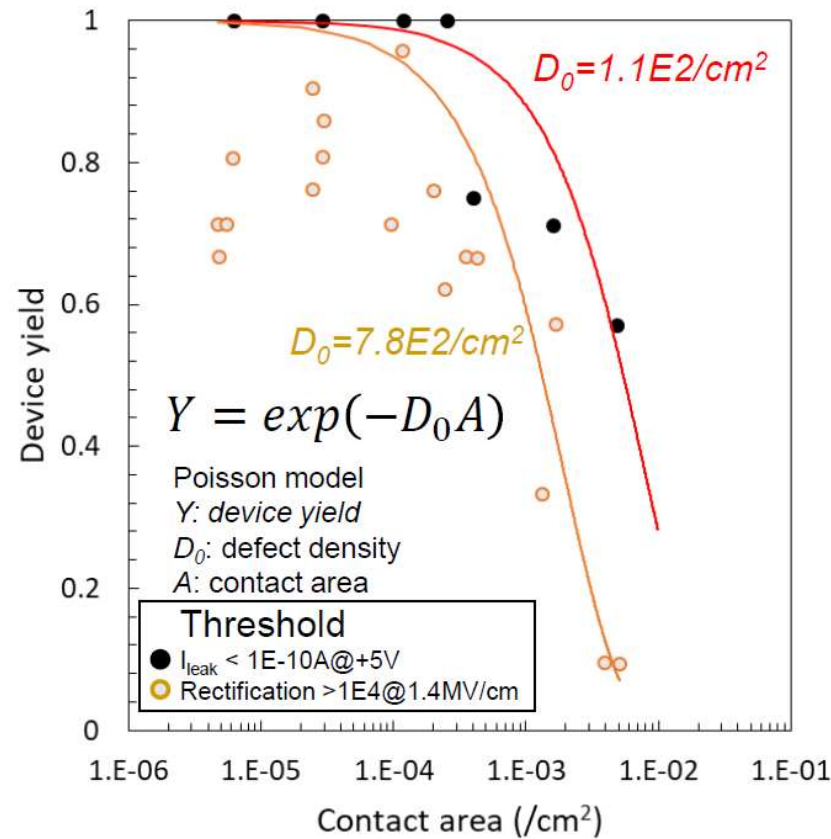
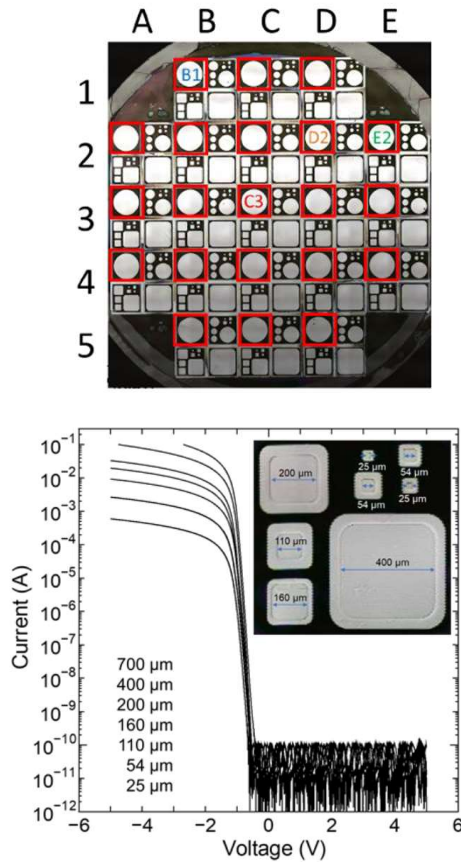


- ① 全47工程のレシピの見直し・改良
3mm角基板、手作業
- ② ミニマルファブの部分導入
0.5"基板、半自動化、準量産化





(2)ダイヤモンドMESFET作製技術の確立とダイヤモンドICの要素技術開発 (産総研担当)

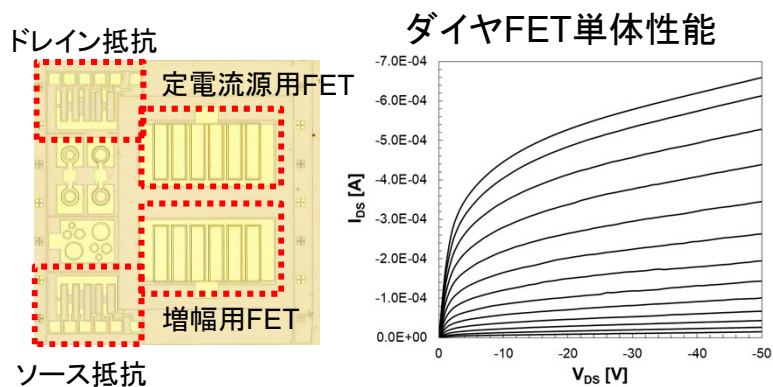


Type of defect	Structure	Density ($/\text{cm}^3$)	Corr. factor
Nonepitaxial crystallites (NCs) on Hillock		6.4E3	致命欠陥 0.532
Pyramidal hillock (PH)		2.2E4	0.222
Frat top hillock (FH)		1.5E4	0.231
Triangle Hillock (TH)		4.2E3	0.299
Dihedral Hillock (DH)		1.4E6	-0.283
Dihedral Hillock with tail		3.1E5	-0.110
Cracks at field-plate edge		5.0E3	致命欠陥 0.726

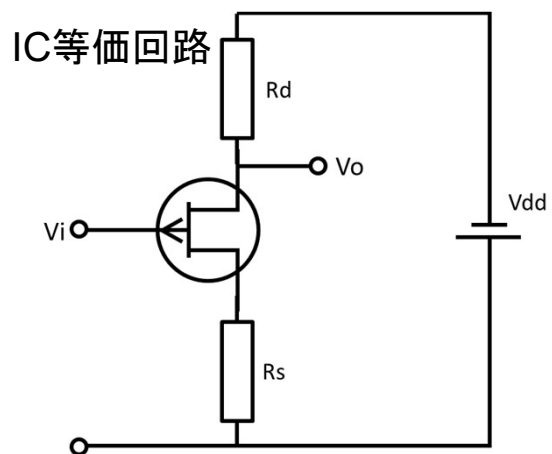
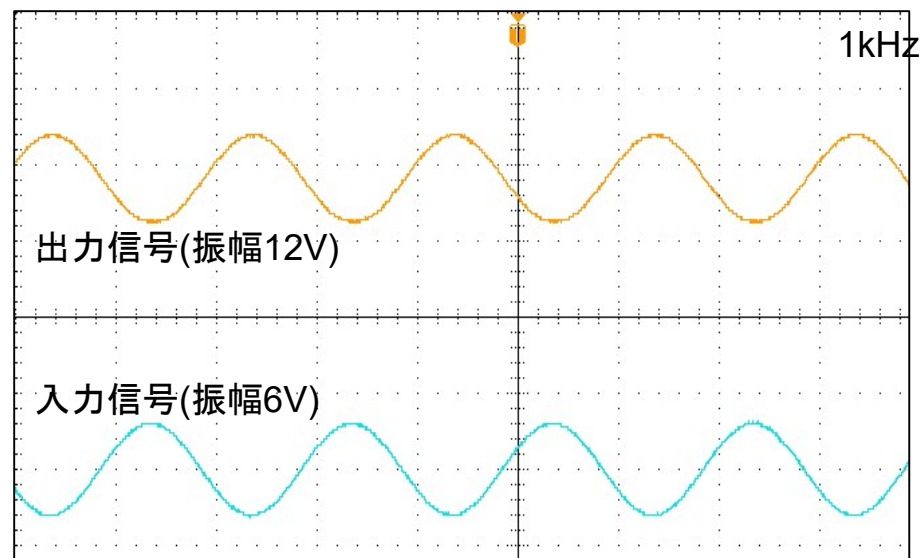
T. Hanada, S. Ohmagari, J. H. Kaneko, and H. Umezawa, Appl. Phys. Lett., vol. 117, 262107 (2020).

ダイヤモンドICの要素技術開発 ダイヤモンドMIMSFETの耐放射線性向上 高温動作の探求






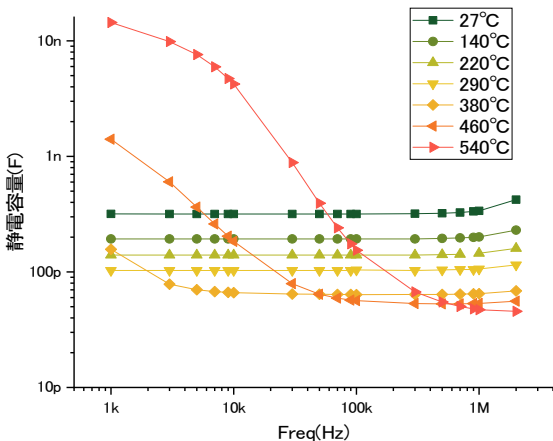
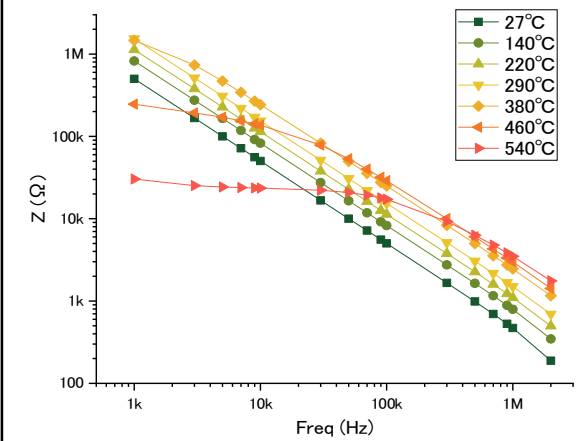
ダイヤICチップと出力特性



高温用電子部品の開発(北大)

300°Cと500°Cでの動作を前提にキャパシタ、抵抗等のモノリシック素子の材料探索を進めた

	キャパシタ	抵抗
300°C	(Ba _{0.5} Sr _{0.5})TiO ₃ 、0.45BCT-0.55BMT	○コンスタンタン等金属抵抗、特にCr等高融点金属の探索 ○オゾン対策技術(パッシベーション)が必要
500°C	サファイア・アルミナ系が主 ⇒ 高容量化(溶射法、ALD法等)が次の課題	

誘電体	(Ba _{0.5} Sr _{0.5})TiO ₃	静電容量の変化はあるが300°Cまでは使用可能	
誘電率	2184(RT)		
 <p>電極4.5mm角 厚さ1.19mm 静電容量320pF (tanδ=0.002)</p>			

この他、パッケージ等の試作、評価も行った。

まとめ

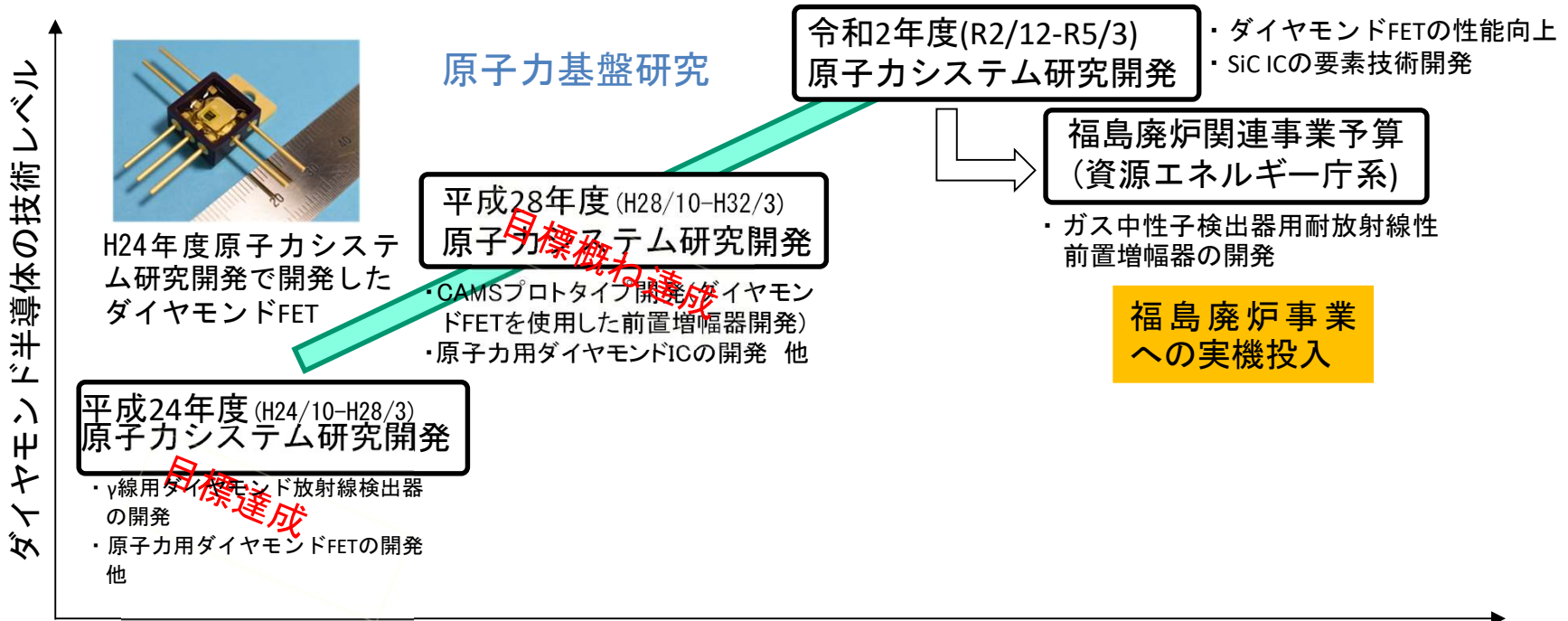
CAMSプロトタイプの開発

- ダイヤモンド γ 線検出器とダイヤモンド電界効果トランジスタ(MESFET)から成る前置増幅器を試作し、動作に成功。
- 5MGy照射後も230°Cで γ 線計測可能であることを確認。
- ダイヤモンドMESFETの製造歩留まりは70%以上に大きく改善
- 一方、ダイヤモンドMESFETはノイズが多く、前置増幅器の実用化にはダイヤモンド電界効果トランジスタの性能向上が必要
- 差動アンプを構築するため、同一性能のダイヤモンド電界効果トランジスタを得る必要
 - ⇒ R2原子カシシステム事業により、性能向上をはかる(アナログ周波数:100MHz、相互コンダクタンス:1mS/mm以上、雑音対策)

ダイヤモンドICの要素技術開発 他

- ダイヤモンドICの要素技術を開発
- 高温環境で動作する受動素子の材料探索を行う
- 1000°C以上でダイヤモンド電子デバイスの動作を確認

ダイヤモンド半導体開発ロードマップ



- 1F対応はR4~R5年度メーカー主導で行う前置増幅器開発にダイヤモンドFETを供給する方向で調整・準備中
- 2021年度中に起業、2024年度に大熊町に工場を建設する方向で調整・準備中
- 順次、マルチプレクサ、PAM等の開発も進める

