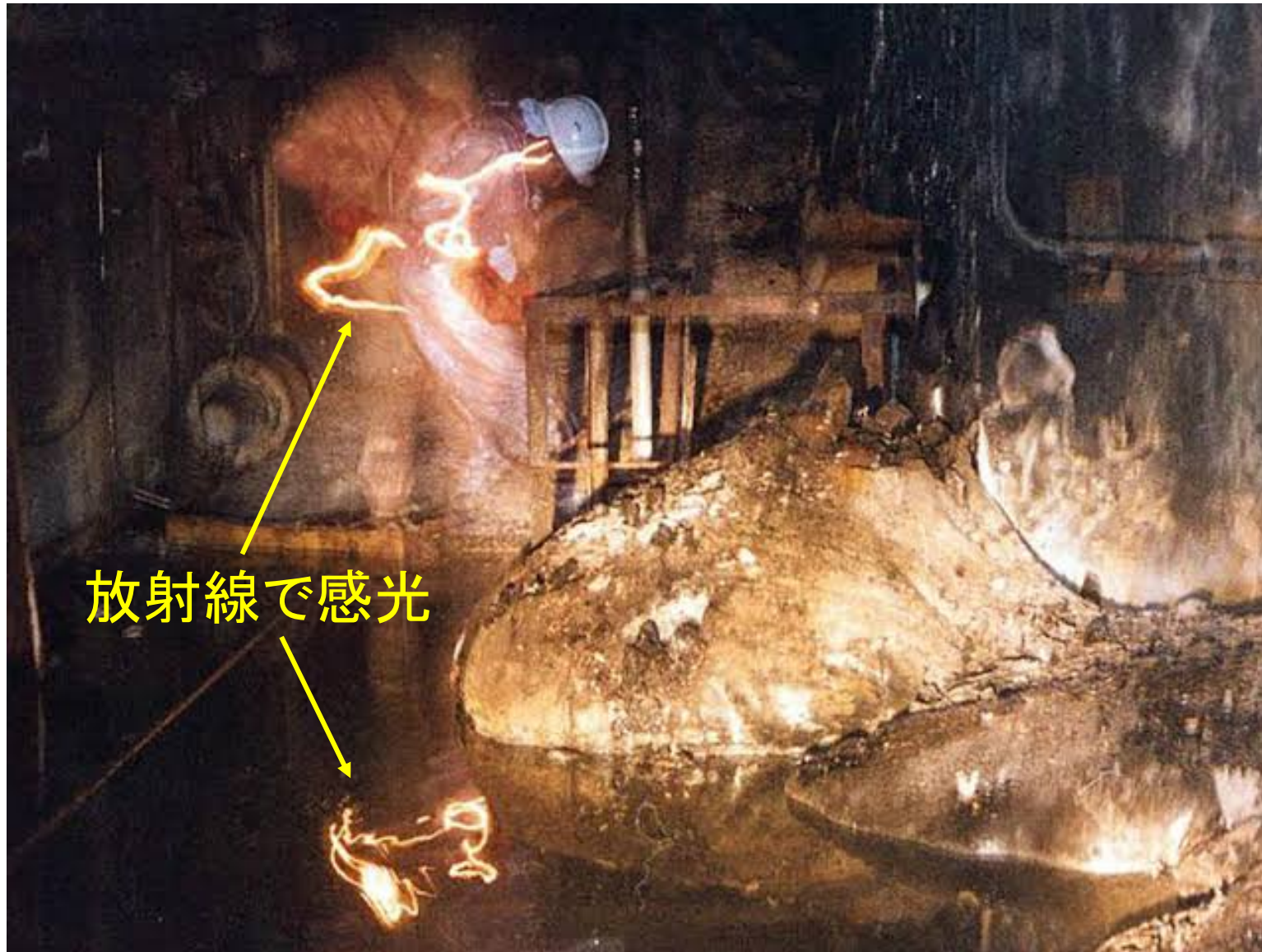


耐放射線性と綺麗な画質を両立 させたデジタルカメラシステム

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所 環境技術開発センター
材料試験炉部 廃止措置準備室

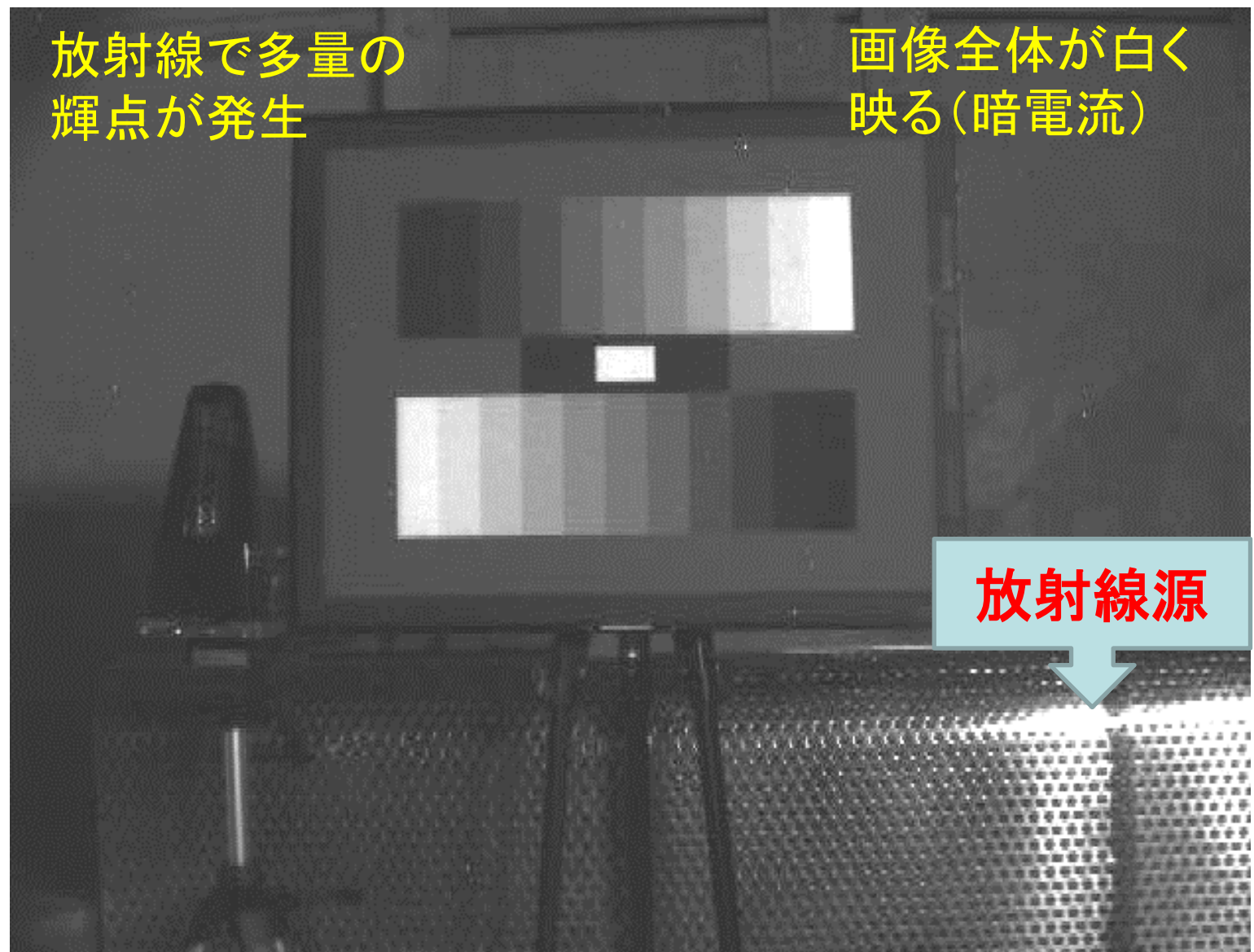
研究副主幹 武内 伴照

2019年11月26日



放射線で感光

チェルノブイリ原子力発電所事故時に生じた
巨大な炉心溶融物の塊。 通称「象の足」



放射線で多量の
輝点が発生

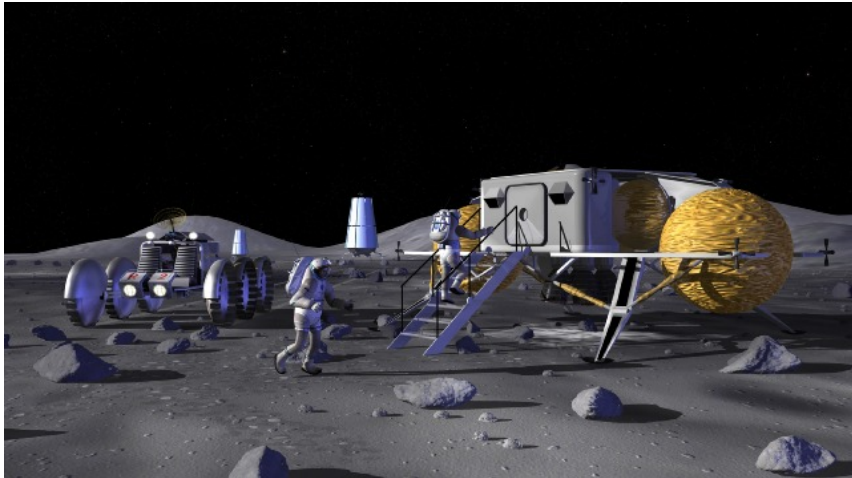
画像全体が白く
映る(暗電流)

放射線源

照射試験設備内に設置した従来型のデジタルカメラによる映像

➡ カメラは放射線に弱い！





デジタルカメラの歴史：

- ✓ 1975年：イーストマン・コダックがデジタル画像データを磁気テープに記録するデジタルカメラを発明
- ✓ 1988年：富士写真フィルムがメモ리카ードに記録するタイプのデジタルカメラを発表

⇒2000年代以降、フィルムカメラのシェアを凌駕し、近年の高性能化とともに利活用される分野が拡大している。

例：スマートフォンのカメラ
医療分野(検査、手術等)
監視カメラ(防犯、記録等)
遠隔ロボット(環境把握、対象物認識等)

宇宙事業や食品の衛生管理上の映像取得に興味のある企業様と共同開発できることを希望しています。

デジタルカメラと放射線:

- ✓ カメラ＝人でいえば目と視神経と脳に相当。
目には、赤色や青色など、光としてとらえた情報を電気信号に変換する機能を持つ網膜がある。
カメラの撮像センサも同様な機能を持っている。
 - ✓ 放射線＝電離作用で物質中に電気を生じさせる作用がある。
- ⇒放射線環境下では、カメラは対象物の色や形状に関する光の情報だけではなく、放射線によって発生した電気信号も拾ってしまう。
さらに放射線により損傷し画面がホワイトアウトしてしまう。



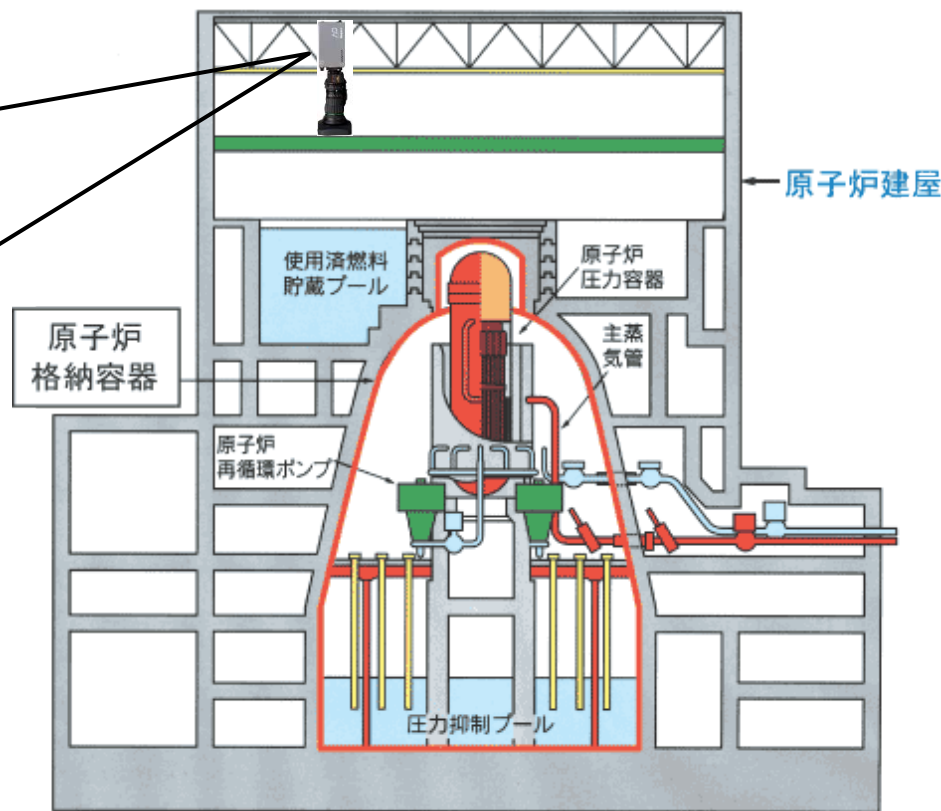
課題：放射線環境下できれいな画像を得ること

固体撮像センサを用いた監視用の据え置き型耐放射線性デジタルカメラを開発。

過酷事故を未然に防止

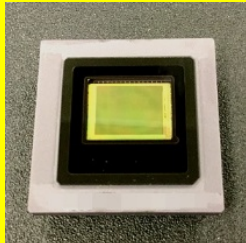
- 炉内情報を可視化
(炉出力、 γ 線量など)
- リアルタイムで監視

使用済燃料プール
(福島第1の3号機)



小型軽量化かつ耐放射線性と綺麗な画質を両立することで汎用性を高めることを目指した。

高い耐放射線性を持つカメラとしては撮像管(真空管)タイプのものが知られている。今回検討した固体撮像センサとの比較を下記に示す。

<p>撮像管</p> 	<p>固体撮像センサ</p> 
<p>小型・軽量化に不利 ⇒電子を加速するために筐体が大きくなりスマートフォン等には決して用いられない</p>	<p>・スマートフォンと全く同様に光検出素子として固体撮像センサ(CMOS)を用いている。 ⇒小型・軽量化に有利</p>
<p>堅牢性に乏しい ⇒真空封止ガラス筐体であり衝撃や振動で損傷しやすい</p>	<p>・CMOSは真空封止ガラスを要せず半導体(シリコン)でできている。 ⇒衝撃や振動による損傷を受けにくい</p>
<p>動作に高電圧を要する ⇒ユーザーに対する安全性が高いとは言えない</p>	<p>・CMOSはスマートフォンで用いられている。 ⇒低電圧(数V)で動作が可能</p>
<p>現在では既にサプライチェーンが無い ⇒ごく一部のメーカーしか製造技術が無い</p>	<p>・現在広く使われているデジタルカメラの多くがCMOSセンサを搭載している ⇒サプライチェーンは強固</p>

光検出素子 (撮像センサ)

高い耐放射線性と高感度

・高解像を両立した「目」
の機能を果たす

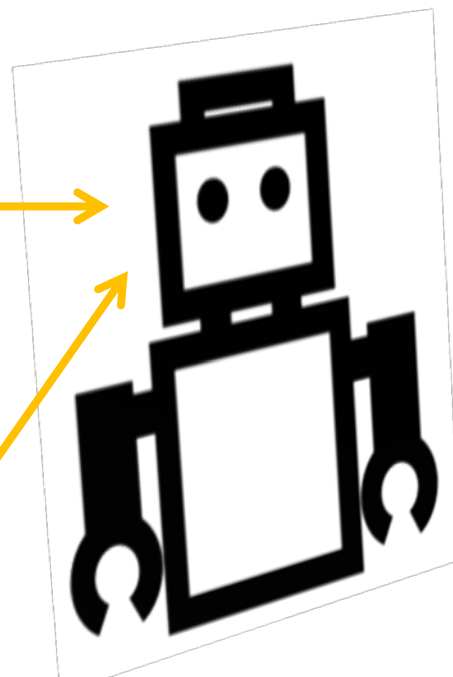


信号処理機能

画質劣化を自動検出して

自己補正する「脳」

の機能を果たす



ロボット等の遠隔機器

放射線、温度、
電磁ノイズ、etc.



被写体

放射線環境下におけるカメラ画質劣化に対する画質改善の一例

人でいえば「目」と「脳」の両方を放射線に強くしたことに相当

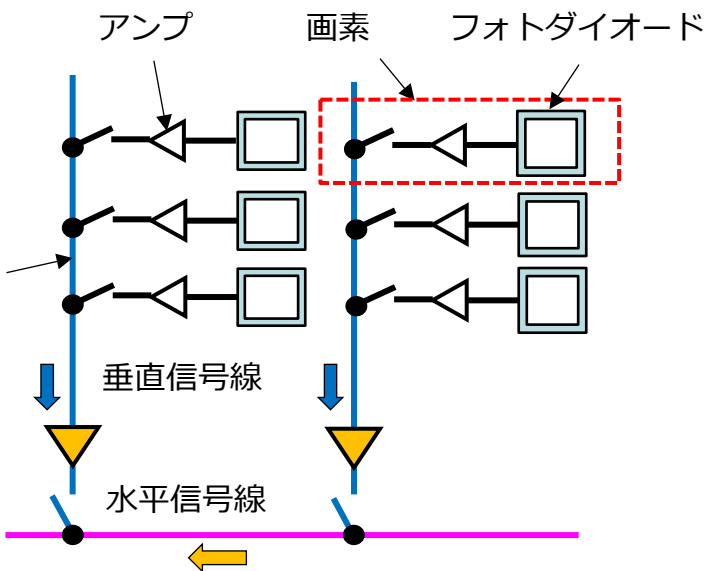
【設計の着眼点】

○CMOSイメージセンサの構造

3トランジスタ型フォトダイオード(3Tr-PD)

4トランジスタ型フォトダイオード(4Tr-PD)

CMOSイメージセンサの構造



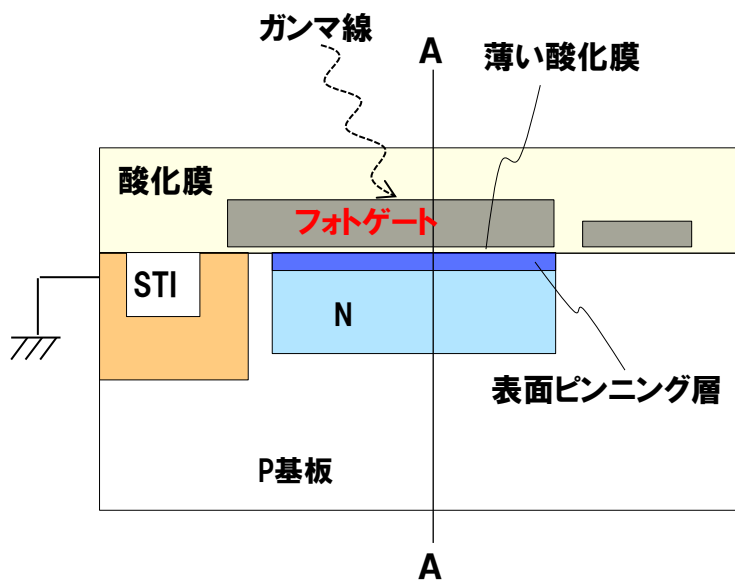
画素回路の基本構造と特徴

	3トランジスタ型 (3T型)	4トランジスタ型 (4T型)
基本回路		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が簡単 ・初期CMOSイメージセンサに使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が複雑 ・高画質(最近のCOMSイメージセンサに使用)

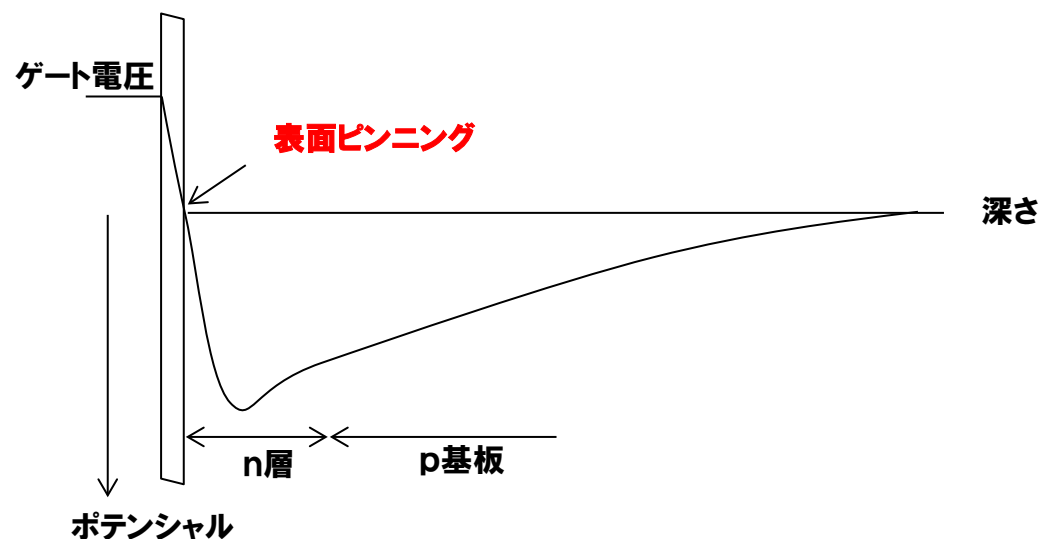
⇒ 放射線により暗電流増加の要因となる**繊細なフォトダイオード(埋め込みフォトダイオード)**を用いない**構造である3T型**を採用

γ線による影響を抑制する構造を検討

- 光電変換部を、薄い酸化膜を介してゲート電極を形成したフォトゲート (PG) 構造とし、酸化膜中で発生する正孔を低減。(左図)
- フォトゲート下のチャンネルにはN層を形成して埋め込みチャンネルとし、フォトゲートに負電圧を印加し、半導体界面に正孔による反転層を形成 (=ピンニング) すれば、界面準位は不活性化され、暗電流の大幅な抑制が実現できる可能性。(右図)



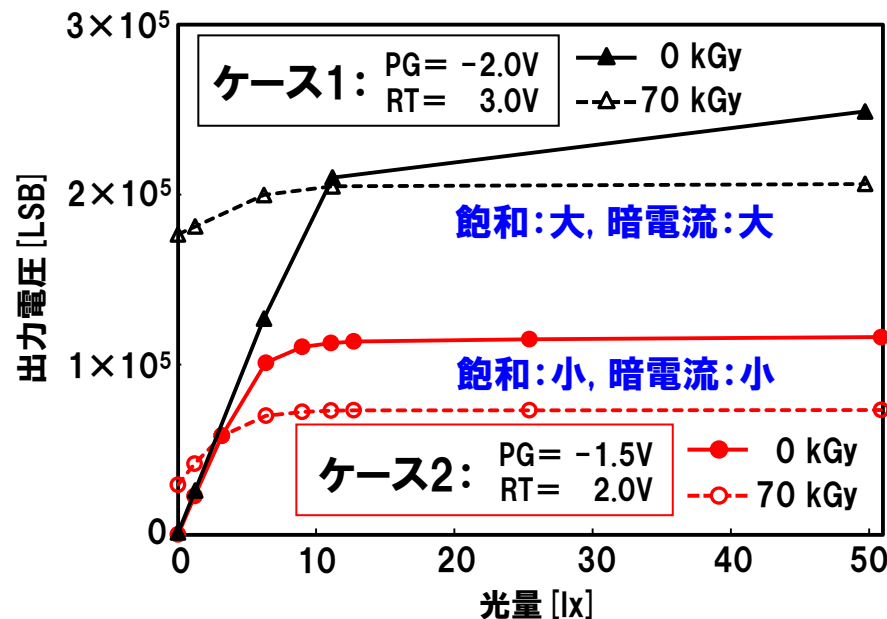
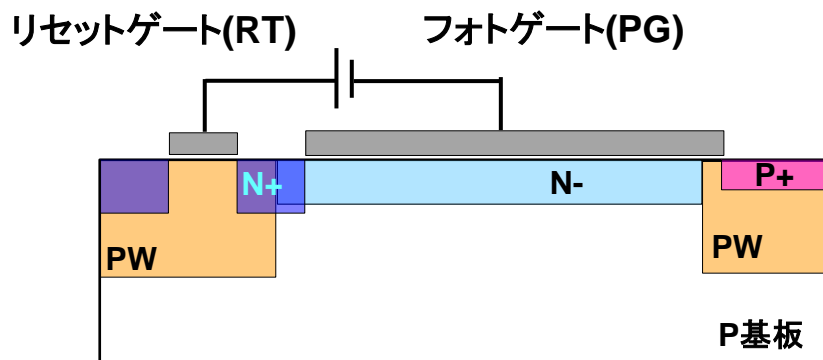
PG型に対するγ線の影響



左図中のA-A断面におけるポテンシャル分布

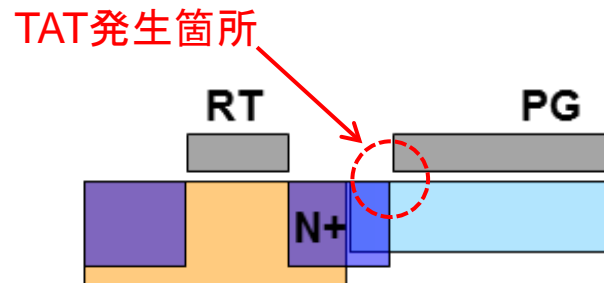
PG型について駆動電圧の変化による素子性能の違いを評価。

フォトゲートとリセットゲートの電位を変更



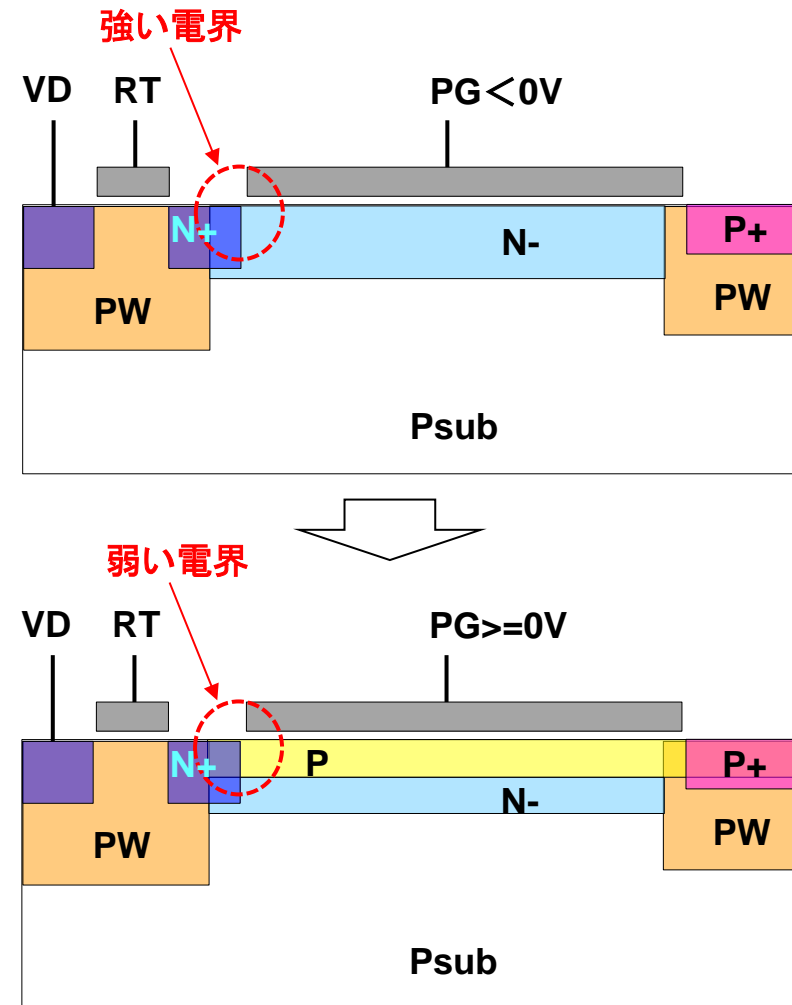
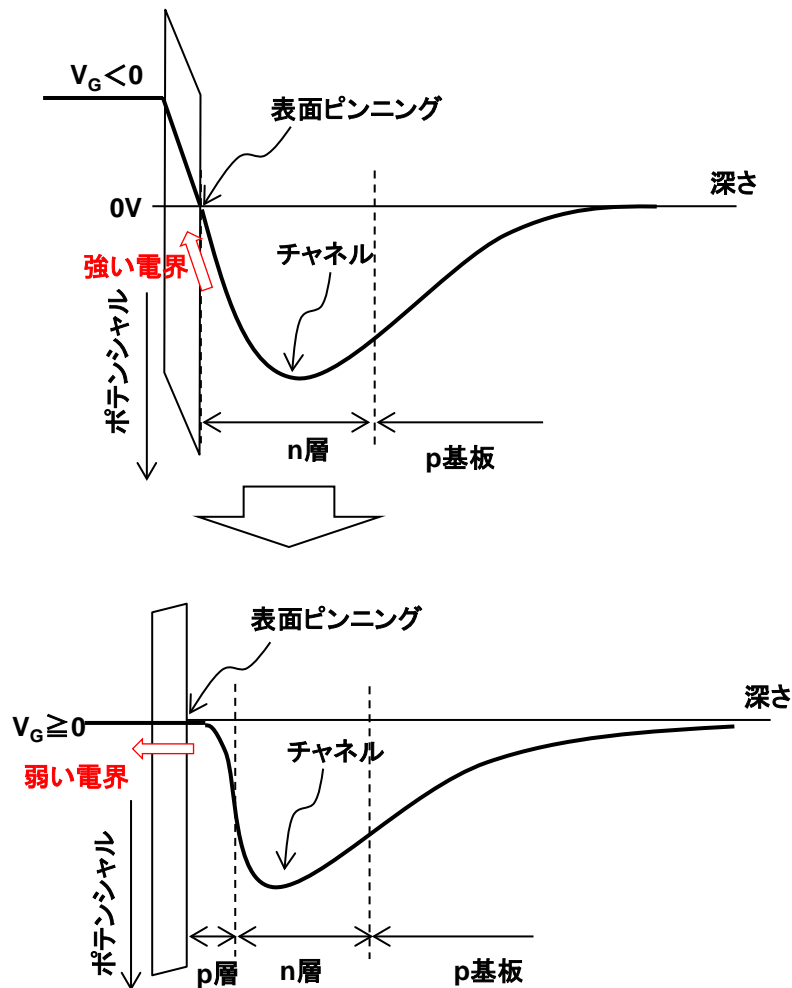
電位変更による影響

- ① PGおよびRTにかける電圧の違いにより、暗電流および飽和電荷量が変化する。
- ② RT電圧を低くすると、飽和が減少する。
- ③ PGを低くするほど、またRT電圧を高くするほど (=RT-PG間電位差が大きいほど)、フォトゲートと電荷検出部の間で電界が集中し、Trap-Assisted Tunneling (TAT) による暗電流が急増すると推測。



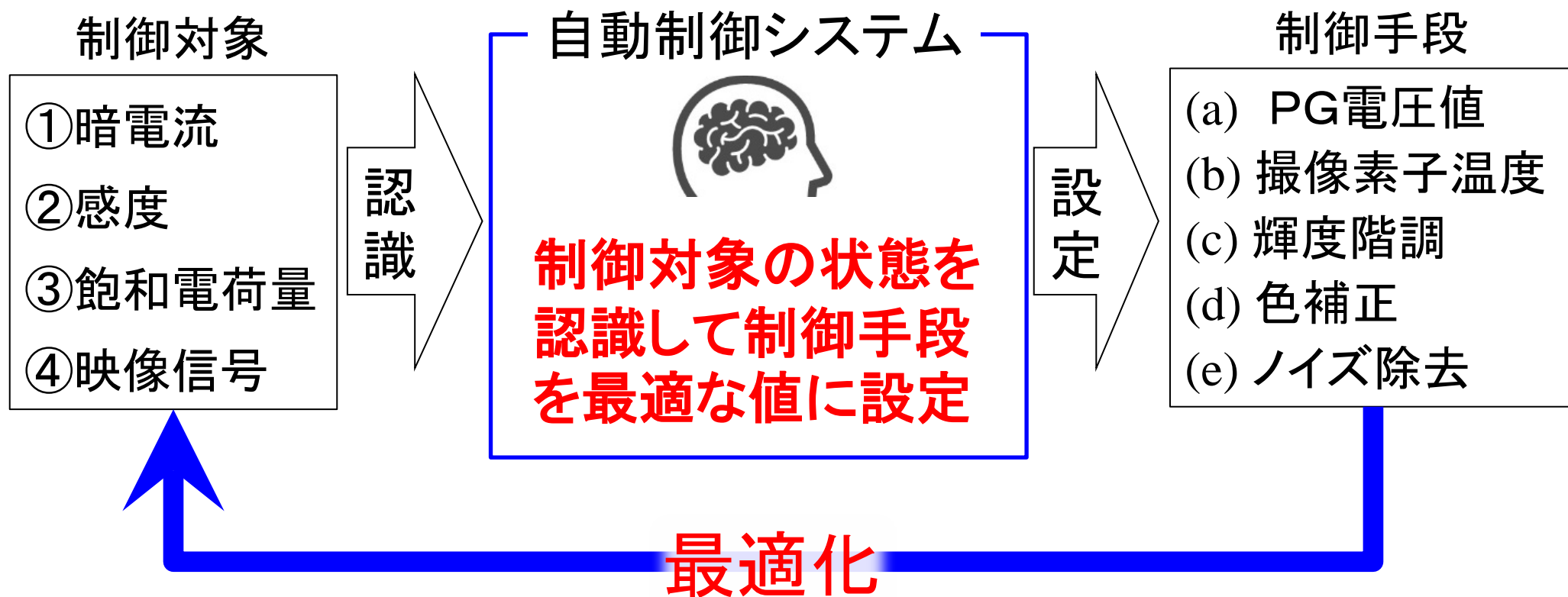
フォトゲート下シリコン表面にP層を設ける構造を新たに導入

⇒ フォトゲート/電荷検出部間の電界集中が抑えられ暗電流が大幅に低下



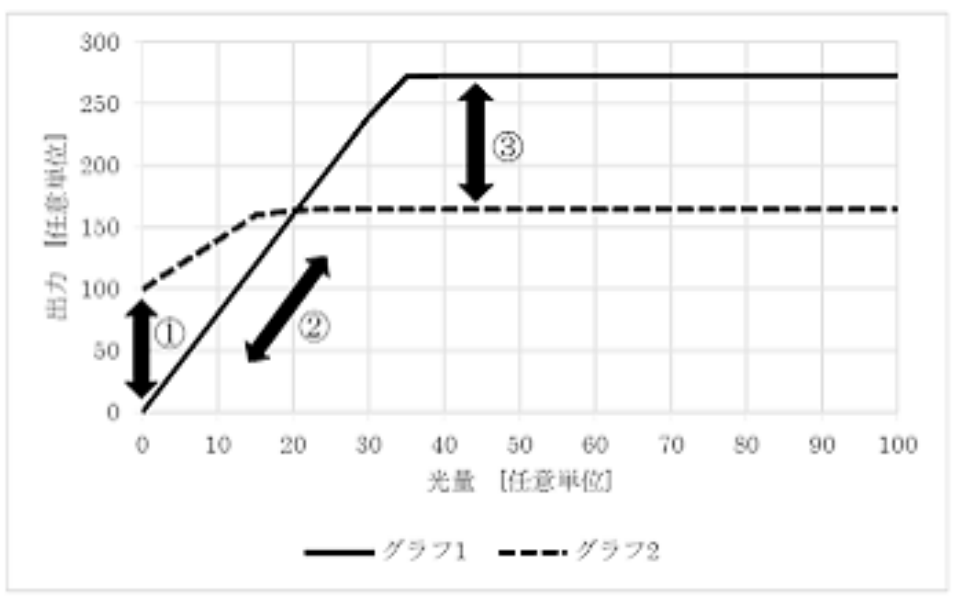
耐放射線性を確保しつつダイナミックレンジの維持と暗電流の低減も図ることもでき綺麗な画質も実現

放射線吸収線量の増加に応じて、①暗電流、②感度、③飽和電荷量の最適化、④映像信号劣化の改善をする方法として(a)CMOS撮像素子に加えるPG電圧値、(b)CMOS撮像素子冷却装置に加える温度制御、(c)映像信号の輝度階調、(d)映像信号の色補正、(e)映像信号のノイズ除去を個別に制御、または総合的に判断して自動制御するシステムを考案。



画質改善自動制御システムのイメージ図

入射光量に対する出力レベルの変化例のグラフを示す。最良の画質をグラフ1、放射線吸収により低下した画質をグラフ2とすると改善項目は以下のとおりとなる。



- ①暗電流
光量ゼロ時の出力レベルが暗電流レベルを表す。
- ②感度
グラフの傾きが大きいほど出力映像の感度が高い。
- ③飽和電荷量
グラフの最高値が飽和電荷量のレベルを表す。
- ④映像信号劣化
映像信号のノイズ成分の増加を映像信号劣化と呼ぶ。放射線吸収による輝点の増加などがある。

入射光量に対する出力レベルの変化例

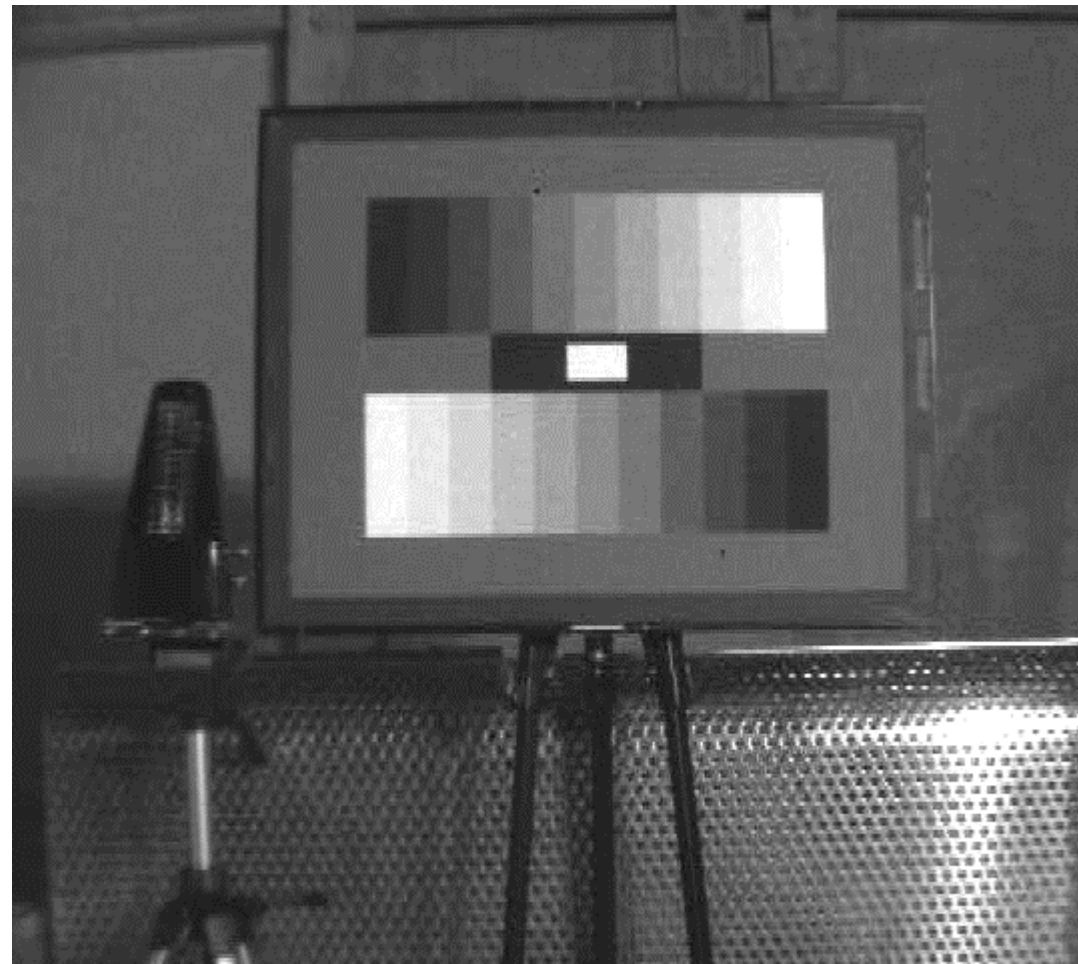
改善対象と改善手段との関係

	①暗電流	②感度	③飽和電荷量	④映像信号劣化
(a) P G 電圧	改善	低下(①改善時)	低下(①改善時)	影響少ない
(b) 冷却	改善	-	-	やや改善
(c) 輝度階調	改善	改善	改善	劣化あり
(d) 色補正	-	-	-	改善
(e) ノイズ除去	やや改善	-	-	改善

画質に関する主要なパラメータである①～④に関して表に示す(a)～(e)の対策を講じることでより綺麗な画質を実現する。



通常の固体撮像センサによる画像



新規技術を適用した画像

新規技術によるデジタルカメラを用いた場合の画像では放射線による輝点の程度と数が大幅に軽減されている

- 原子力分野の放射線環境における映像取得
- 宇宙航空分野における映像取得
- 食品流通分野における放射線滅菌時の監視

その他、これまでデジタルカメラの使用が不可能と考えるのが常識とされていた分野への適用等

- 現在、要素技術に関しては「目」(=撮像素子)と「脳」(=映像処理)の耐放射線性に関する有効性は実証済み。
- 実用化に向け、「脳」の映像処理機能の自動制御がカメラシステムに未実装であるという課題があり、実装するとともに放射線環境下における実証試験を要する。
- 現在は一連の信号伝達が可能な最低限のシステム構成だが、今後はコンシューマー向けに使い勝手も意識した構成とする場合の検討や設計も行っていく。

- 映像取得に関し、宇宙事業への展開を考えている企業、食品流通分野での放射線滅菌の監視を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。
- 放射線環境下における映像・通信分野に強い企業との協力を希望。
- 利用相談等を通じた技術の改良や産業分野への展開。

本技術の利用の可能性について
ご検討・ご提案いただけますと幸いです。

- **発明の名称** : **光検出素子、固体撮像装置
及びその駆動方法**
- **出願番号** : **特願2017-078851**
- **公開番号** : **特開2018-182044**
- **出願人** : **日本原子力研究開発機構、株式会
社ブルックマンテクノロジー、池上通信
機株式会社**
- **発明者** : **武内 伴照、土谷 邦彦、渡辺 恭志、
小沢 治**

- **発明の名称** : **撮像装置**
- **出願番号** : **特願2017-058161**
- **公開番号** : **特開2018-160858**
- **出願人** : **日本原子力研究開発機構、池上通信機株式会社、株式会社ブルックマンテクノロジー**
- **発明者** : **武内 伴照、土谷 邦彦、加藤真一、渡辺恭志**

- 2012年-2016年 資源エネルギー庁発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業に採択
- 2012年-現在 池上通信機株式会社と共同研究実施

**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**

TEL : 029-284-3420

e-mail : seika.riyou@jaea.go.jp