

廃炉・高放射線下の測定



登壇者名 實川 資朗

所属等

連絡先 Jitsukawa.shiro@gmail.com

法人設立予定時期 (西暦)	2021年
事業活動拠点都道府県	福島県(2021年途中から、東京都に移動を予定)
個人SNS等	未設定
事業プラン名	廃炉用耐放射線性遠隔微小振動計による構造損傷評価システムの開発
事業プラン概要	<p>作業安全の確保は、廃炉事業で重要である。一方、炉の構造物は、事故時に生じた熔融燃料による加熱などの影響で、強度低下も懸念されており、状況把握の重要性は高い。しかし、核燃料デブリが発する強い放射線のため容易でない。同じ理由から、核燃料デブリ自体の分布の把握も時間を要している。</p> <p>本事業では、炉内状況把握のための耐放射線性センサーシステムを開発する。このシステムにより、遠隔で炉の構造物の強度劣化及び事故時の温度分布を把握する。強度の評価は、今後の大地震などへの備えであり、また事故時の温度から、事故時の燃料の流れを知り、デブリ分布の評価を加速し、これらを通じ地域復興の加速に寄与したい。開発対象は、高耐放射線性(通常品の10倍程度)の小型遠隔式微小振動計と利用技術からなる、音速分布を測定/解析するシステムである。この技術を発展させ(耐放射線性集積素子等)、従来法では不可能な計測を実現させ、新型炉の安全性向上にも寄与する。</p>
福島/本プログラム にける想い	<p>廃炉の安全な促進は、地域復興の加速につながるため、これに技術開発で寄与できればと考えます。私は、核分裂炉の推進派ではありませんが、原子力への不信が、SDGs等の重要オプションである、原発利用への問題になっていると思います。このため本事業での高放射線レベル下での計測能力の強化を通じ、新型炉等の安全性を向上させ、社会からの信頼を確保し、エネルギー選択の自由度拡大に、多少なりとも寄与できればと考えます。</p>
イベントにご参加 いただく方への一言	<p>本事業では、廃炉から始まり、世界的な発展が期待される、新型原子炉システムの安全性向上を、従来よりも長寿命/過酷な放射線下での計測実現により達成を目指します。使用技術は、これまで福島高専で行った、文科省の廃炉R&D事業(英知事業)の中で、実現性及び価値が最も高そうなものを選択しました。この英知事業では、廃炉のマネジメント機関(NDF、IRIDなど)の方々から、ご意見を頂戴し、進めて来ました。</p>

遠隔型構造損傷評価システム

- 福島第一廃炉から新型炉に -

- ・ プレゼンテーション資料 p.1-9
- ・ 参考説明資料 p.10-26

2021年1月
實川資朗

遠隔型構造損傷評価システム

- 福島第一廃炉から新型炉に -

放射線に強い電子機器システム(小型遠隔振動計)の提案

福島第一廃炉から始まり、次世代の新型炉の安全性にも寄与、

- 廃炉の安全な促進により地域の復興に、

- 安全性向上による社会からの信用改善(新型炉はSDGsの有力手段)

将来の発展に向けた放射線利用の拡大は必須(宇宙長期滞在等)

2021年1月

實川資朗

[目指す方向と課題]

福島第一の安全な廃炉促進→地域の復興加速につながる

しかし、炉心の放射線は強く、
調査に時間を要す

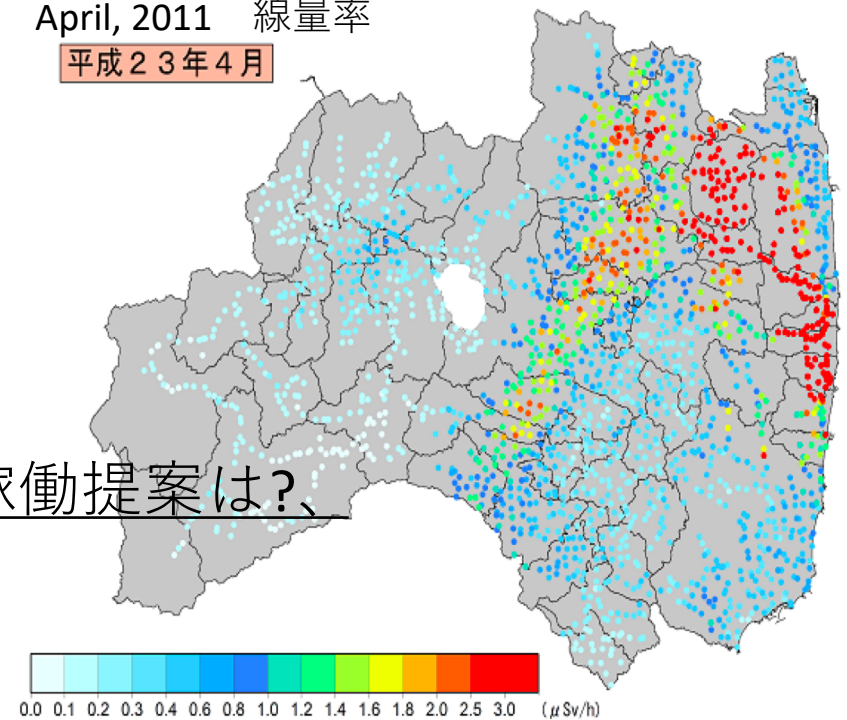
高放射線下測定技術の提案

ところで極端な例だが、福島での原発再稼働提案は?、
安全への不信のため不可能では?

新型原子炉(SDGsの重要オプション)
への社会の信頼も、安全確保がキー
安全性向上への寄与を目指す技術の提案である

April, 2011 線量率

平成23年4月



女川原子力発電所の被害状況

- 1号機 高圧電源盤の火災

福島で再稼働の話が出るとは考えにくい
(対象となる炉も無いが)

再稼働する女川原発の
高圧電源盤
(震災直後とのこと →)



<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/files/houkoku230530-2.pdf>

2020年3月 原子力産業新聞から

[現状 改善を要す事柄]

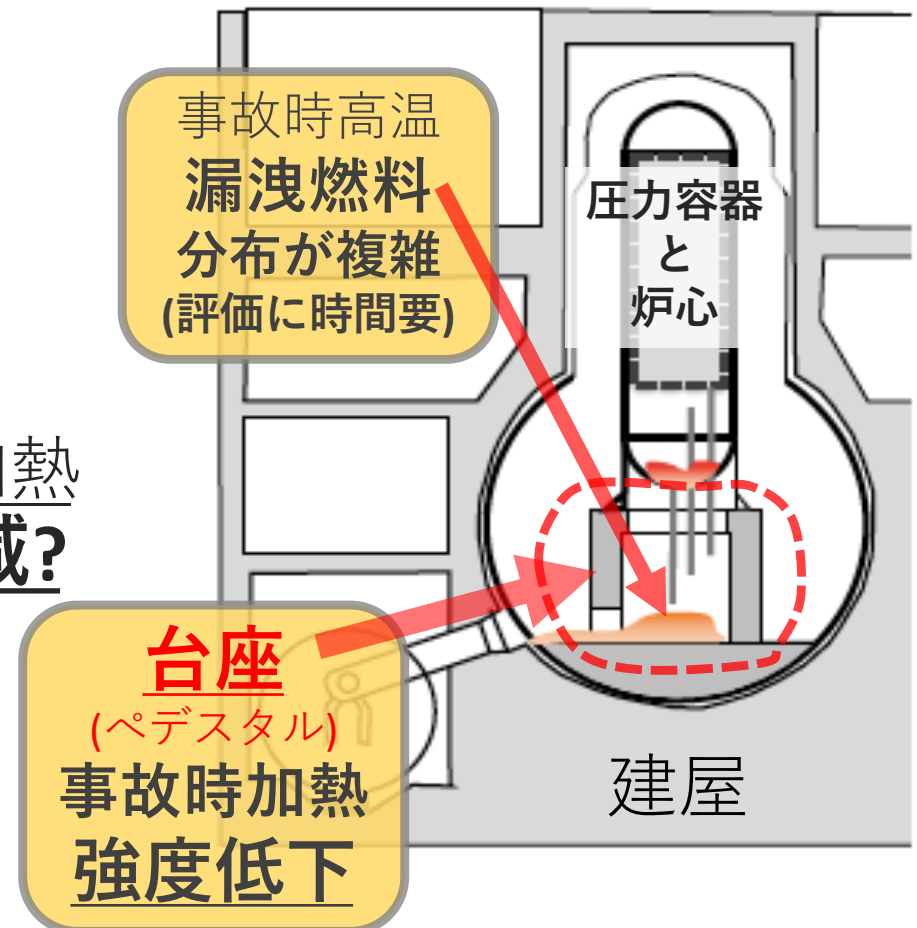
事故時、高温で溶けた核燃料が加熱/穴を → **炉の強度低下等**

**廃炉中に、再び大地震が起きたら
どうなる?
懸念を持つ技術者もいるようだ**

高温の核燃料が流れ、台座/床を加熱
⇒ **コンクリート強度等が大幅減?**

⇒ **核燃料(デブリ)分布が複雑**
評価に時間要す(2020年一部開始)

⇒ **強度や核燃料分布測定の加速手法が重要**



[課題/ニーズ仮説](存在するギャップから)

加熱による台座などの強度低下及び

高温核燃料デブリ等の分布推定を加速する方法の提案

⇒ **高放射線下測定技術; 耐照射性遠隔振動計システム**

→ 廃炉進捗の加速に寄与(地域復興にも)

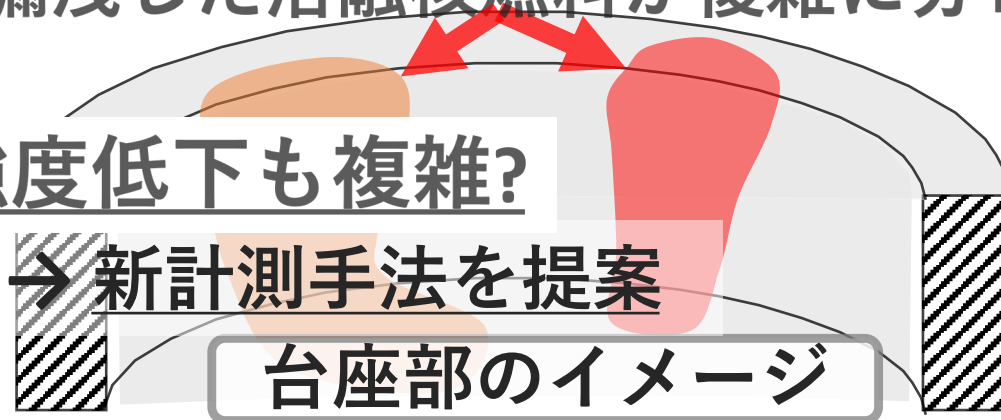
→ 福島の実験から、
世界の新型炉等の
安全向上と
信頼形成に

漏洩した溶融核燃料が複雑に分布

強度低下も複雑?

→ **新計測手法を提案**

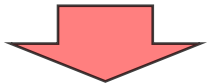
台座部のイメージ



用途仮説（バリュープロポジション 1/2）

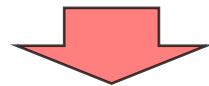
- ・ 音速(弾性率)分布と強度と事故時温度は相関

(1) コンクリートを打撃



(2) 振動(音速等)検出

耐放射線振動計システム開発



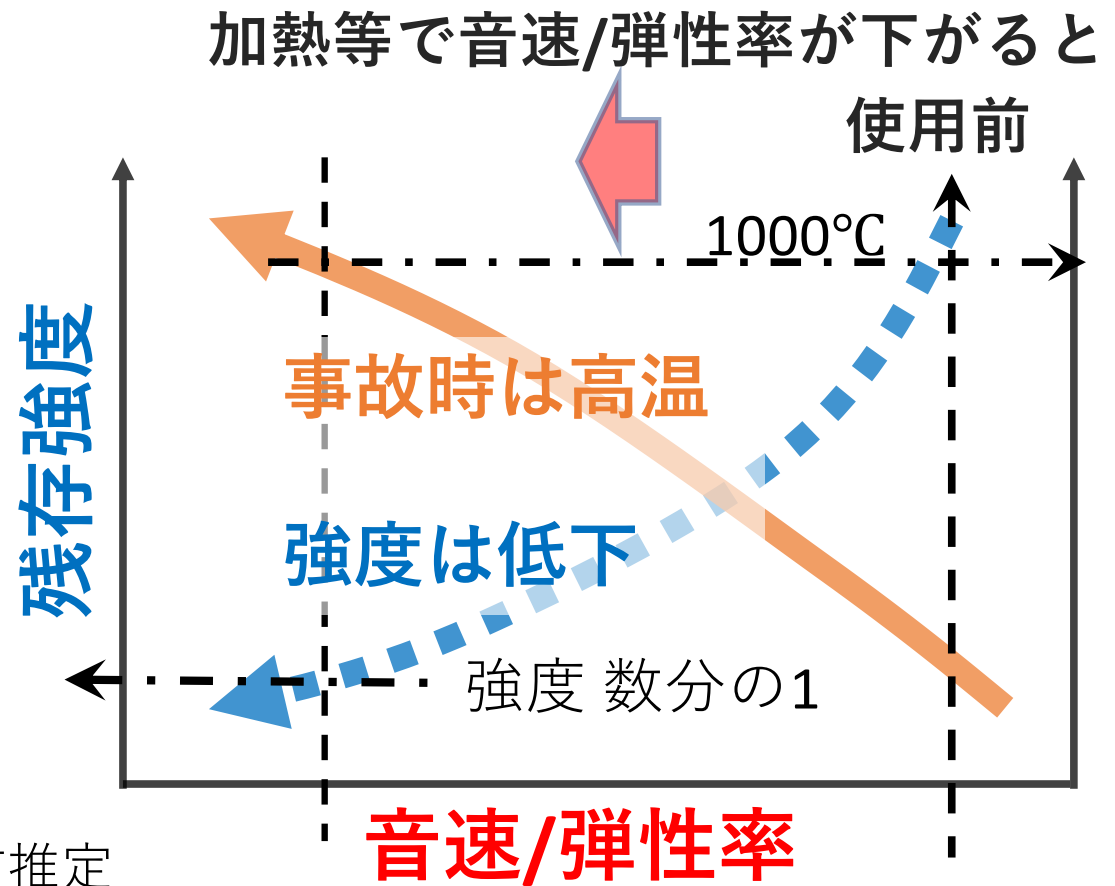
(3) 強度を推定

コンクリート強度は低下

+

(4) 事故時温度推定

溶融核燃料の流れ → デブリ分布推定



用途仮説（バリュープロポジション 2/2）

(1)安全確保に向け多数の耐放射線小型遠隔振動計設置

(2)打撃を加え、
音速/弾性率分布測定

(3)強度と事故時温度

(4)大地震への準備、
デブリ回収作業性向上



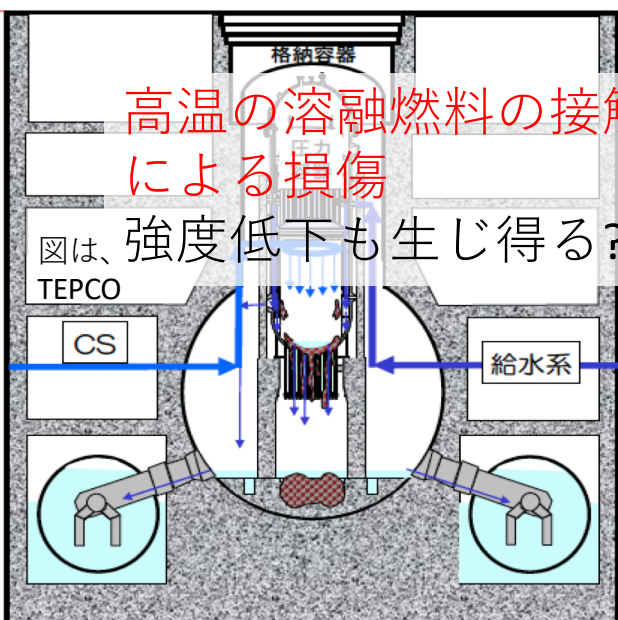
最高レベルの放射線下寿命を持つアナログ機器を開発

誰になにを求めているか

- **ベンチャーを立ち上げる意義** --- 是非、連携
大メーカー社員は分かっても提案無し(広領域高コスト; 3億円/3年)
ベンチャーなら低コスト(連携)、計測による安全向上を開拓
- **共通関心を持つグループ/企業との連携**(将来の競合者も)
実現性/有効性が知られて居ないので発信する必要
- 展開は、**廃炉の安全な進捗加速、新型炉安全性(SDGs寄与)**
→ 社会から見た原子炉への信頼回復に寄与できれば
- **共同研究を含む事業パートナー及び出資者**を想定
福島第一廃炉への適用については、基本的にB to Bを想定ですが
→ メーカー、国(IRID)などとの共同研究と共に、
廃炉の研究者(学会)などとの連携し実用性を広めること

共通関心を持つ方々へ → 廃炉とその先

福島第一での 遠隔計測による廃炉の 促進と安全性向上



©2012 The Tokyo Electric Power Company, INC. All Rights Reserved.

54

← 耐放射線性 小型遠隔型振動計
+ 解析システム

既存技術 ←→ 開発中技術

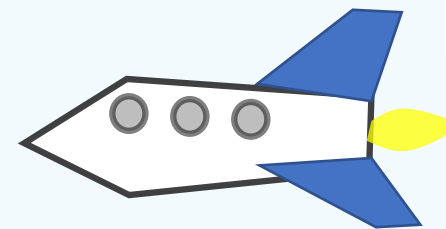
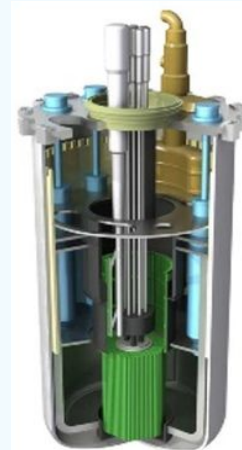
← 1F事故時の損傷の影響を知る

SDGsに寄与する
新型原子炉の安全性
向上

宇宙の長期間
滞在用電子機
器

是非、
お声がけ下さい。

資源エネルギー庁「原子力にいま起こっているイノベーション～次世代の原子炉はどんな姿？」から→
新型炉は、2030年までに56基とも
(既存の発電炉は全部で140基余)



耐放射線性を考慮した遠隔型微小振動計 及び 能動素子の初期的検討

Development of the radiation resistant remote vibration sensing equipment
for the reactor decommissioning

實川 資朗

(福島工業高等専門学校 非常勤講師)

- 背景: 高専などにおける廃炉技術研究開発(英知事業)の概要など
- 遠隔微小振動計とその応用
- 耐放射線性能動素子(集積化できる)としての微小真空管

背景

- ・福島第一原発が立地する福島県浜通りの唯一の工学系で高等教育機関として、
大学、全国の高専(高専協議会)、地元などの企業、さらに原子力機構の協力を受け、
- ・文科省の英知事業で、基盤的研究を実施(2019年度まで)
- ・今回の報告は、このバイプロダクトの一部
背景として、簡単に事業の内容紹介を行う

デブリサンプリング技術から、構造材料の健全性、廃棄物処理、
さらに社会科学課題までを含む活動

(なお、英知事業とは、文科省による「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」で、この一つとして実施できたもので、助成などに感謝申し上げます)

適用例の説明(作業や試料の流れなど) --- 多数の教育機関などによる成果

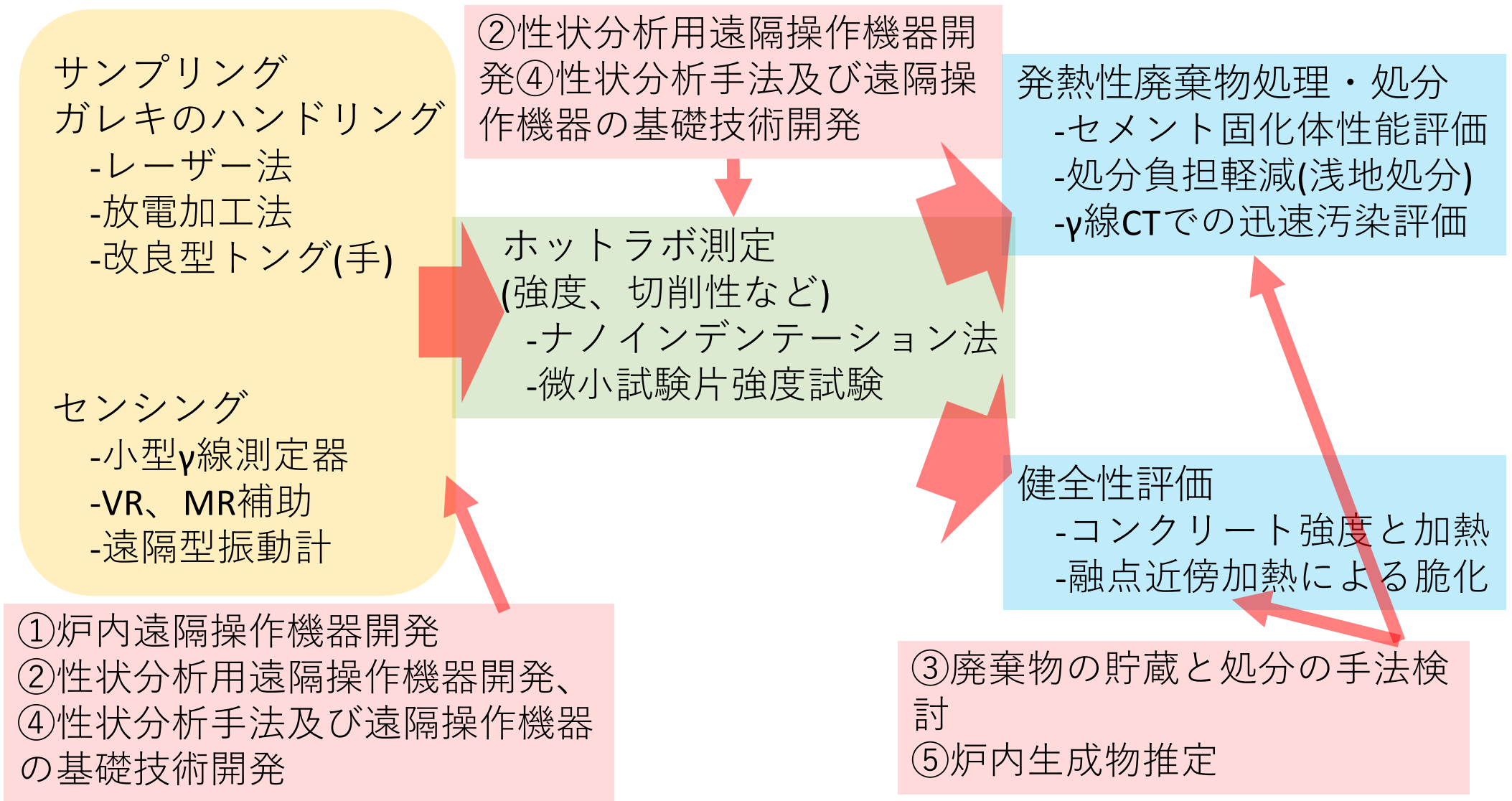


図1 適用例の説明及び研究開発項目①から⑤の関係(事業の成果報告書などから)

放電加工ヘッド
γ線測定, VR/MR

高専, IRID, JAEA共同で
インテグレーションも検討

福島高専 緑川先生 他
都城高専 原田先生

都立産技高専
吉田先生

サンプリング
ガレキのハンドリング
-レーザー法
-放電加工法
-改良型トンク(手)

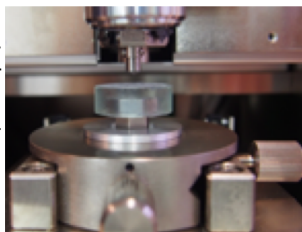
センシング
-小型γ線測定器
-VR、MR補助
-遠隔型振動計



アーム型遠隔機器
(IRID) リンク機構
センサー等
(< 10kg)

概略図

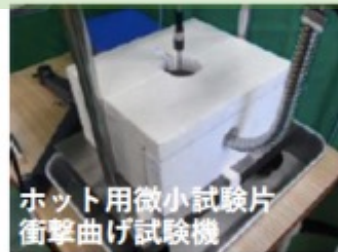
茨城高専
金成先生
ほか



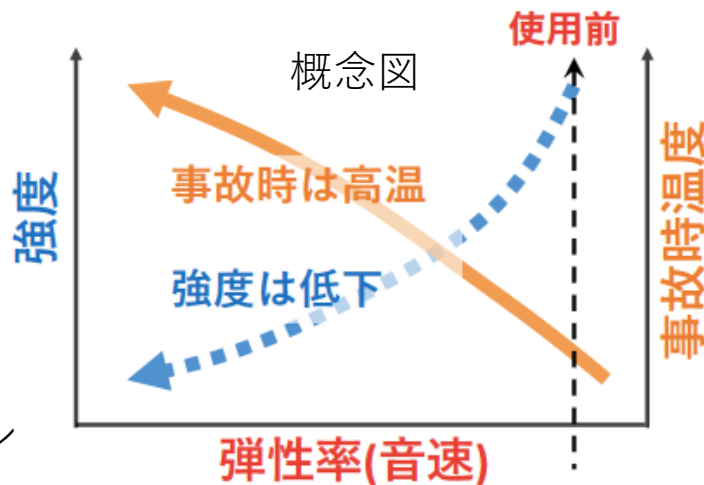
ナノイン
デンテー
ション

ホットラボ測定
(強度、切削性など)
-ナノインデンテーション法
-微小試験片強度試験

都城高専
高橋先生



恒温槽 (0°C ~ -190°Cまで)



発熱性廃棄物処理・
処分
-セメント固化体性能評価
-処分負担軽減(浅地処分)
-γ線CTでの迅速汚染評価

健全性評価
-コンクリート強度と加熱
-加熱による鋼材の脆化等

図2 機器の健全性評価への適用の場合

内容の例

- (i) デブリのサンプリングや切削法 絶縁体に適用できる
放電加工法システムの開発(都立高専)
- (ii) 廃棄物中の汚染物質の核種と分布の γ 線CTによる非破壊評価(JAEA大洗)
- (iii) 特に、今回の報告に関係が深いものとしては、

構造材料への熱影響

- コンクリートの強度への熱影響(従来よりも加熱範囲を広げた)
- 微細組織、色彩変化、弾性率などから構造材料への熱影響
(コンクリート及び鋼材)(福島高専、木更津高専、都城高専など)

遠隔測定手法

- 耐放射線性の高いアナログ式の距離計、遠隔微小振動計(福島高専)
- さらに、高度化の試みとしての微小真空管(集積回路想定)の開発

遠隔微小振動計の用途について

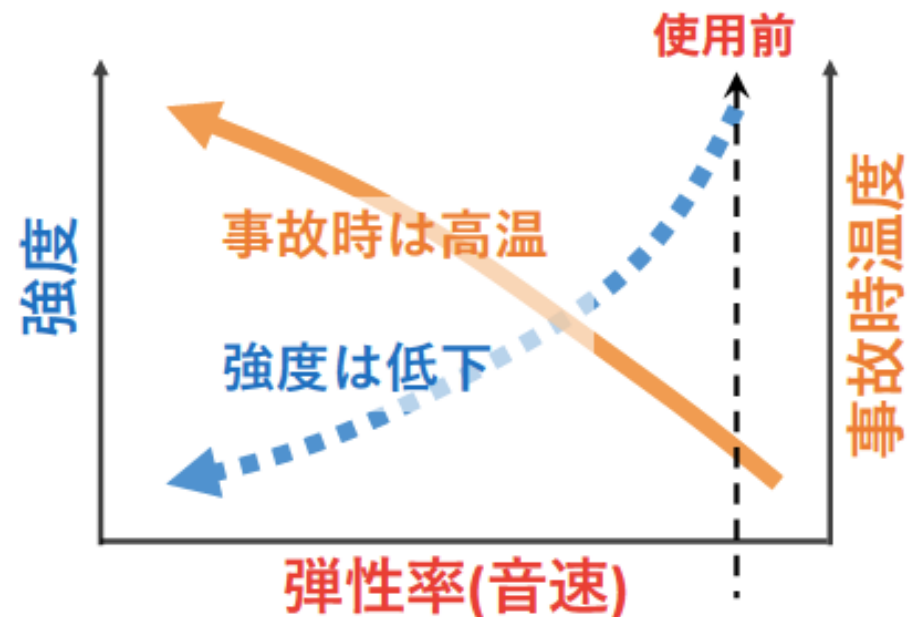
- ・ 廃炉の作業に際しての、構造物の破壊の前駆現象の検出 (アコースティックエミッション)
- ・ コンクリートの音速測定による熱影響推定 (事故時温度推定、強度低下など)

弾性率と残存強度の関係(福島高専 緑川先生他、都城高専 原田先生)

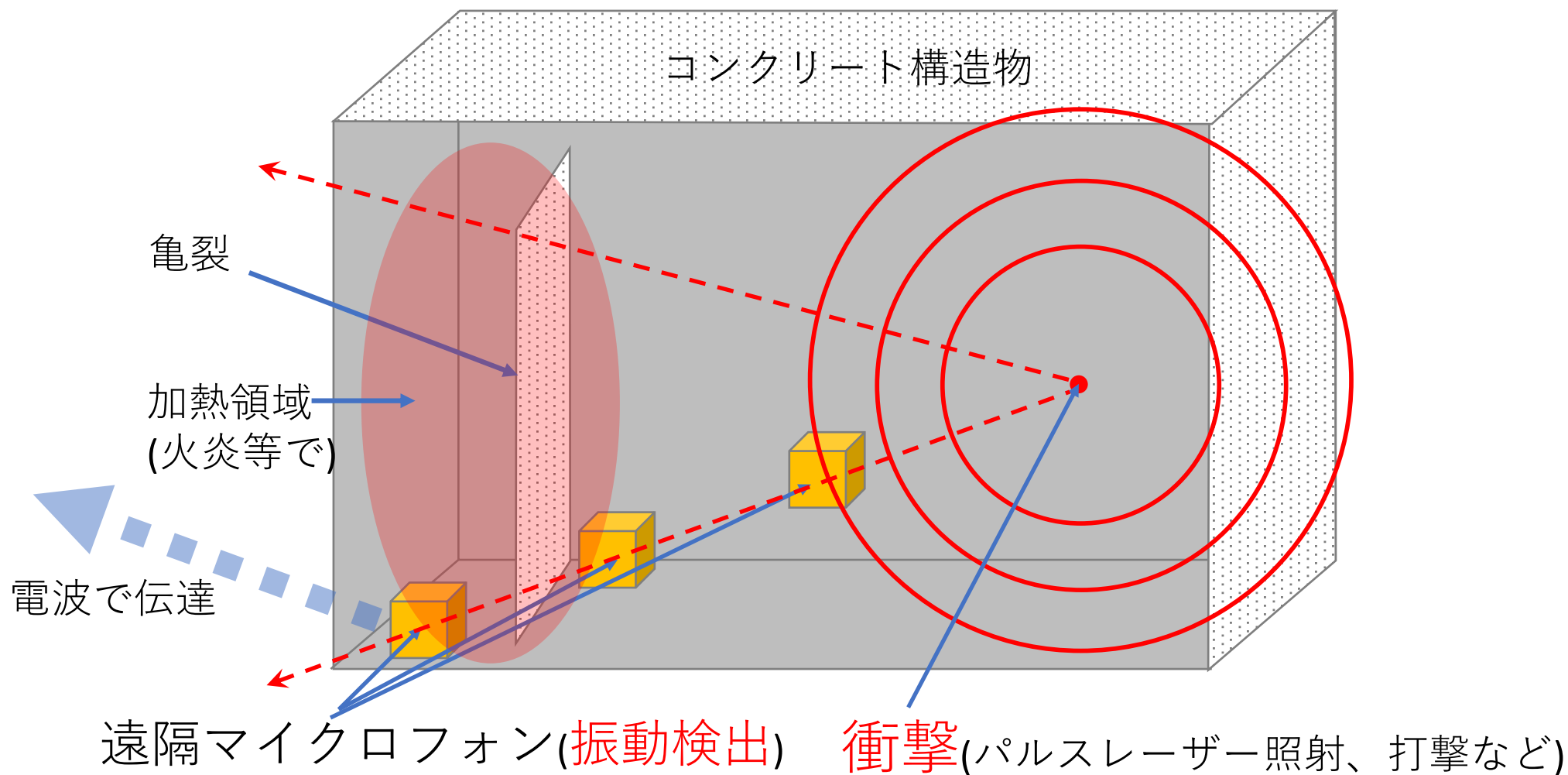
圧縮強度とヤング率の関係
(土木学会の曲線と異なる)

- 強度が半分に低下すると、ヤング率は20%以下に低下

- ヤング率の測定精度への要求は、あまり厳しく無い? --- 使える可能性

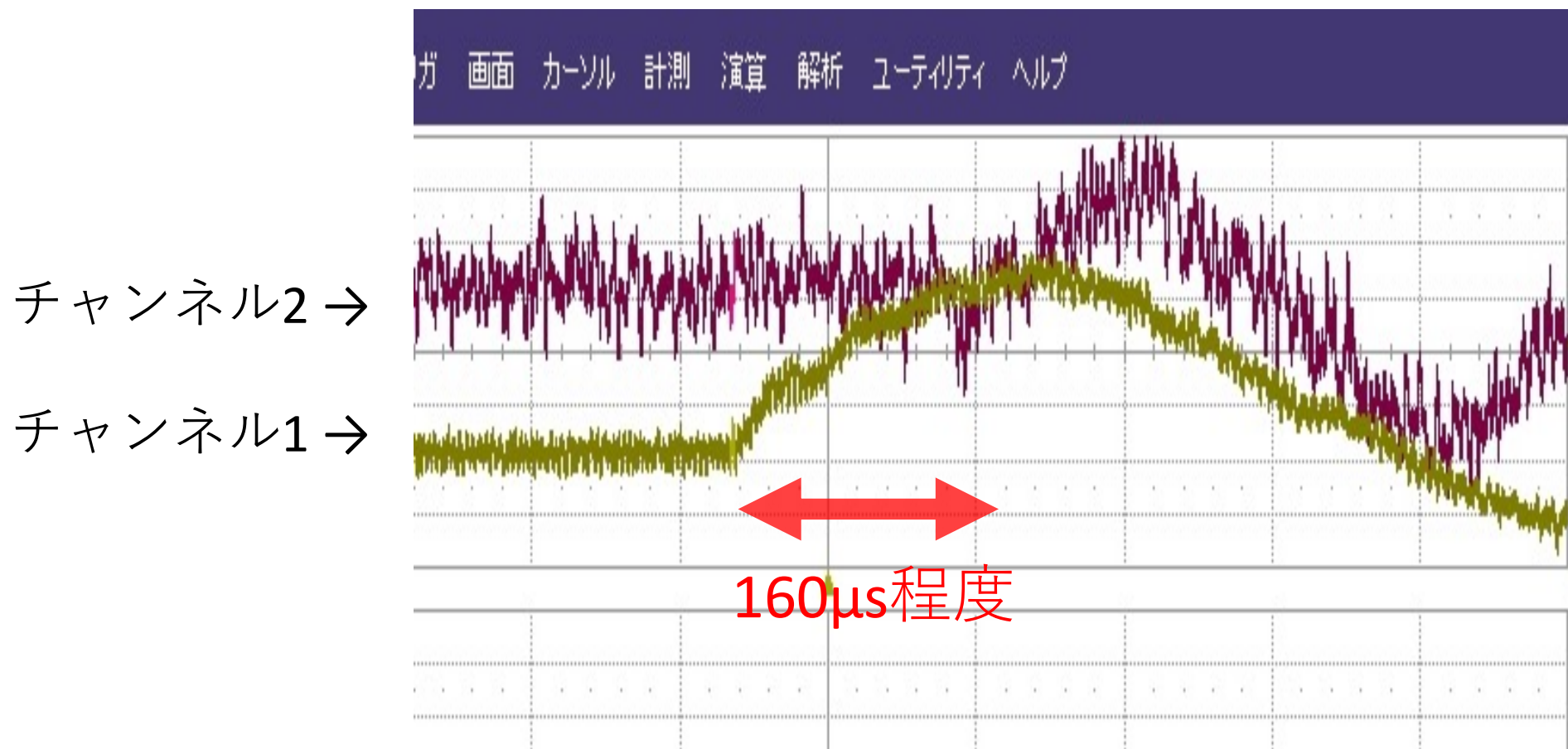


音速($= (E/\rho)^{1/2}$)、振幅による特性変化の検出概念



しばしば問題とされる「サンプルの代表性」の問題解決にもつながる?
(アイデアは、大成建設 近藤さま、谷口さま、若狭湾研究センターの山田さまなどから)

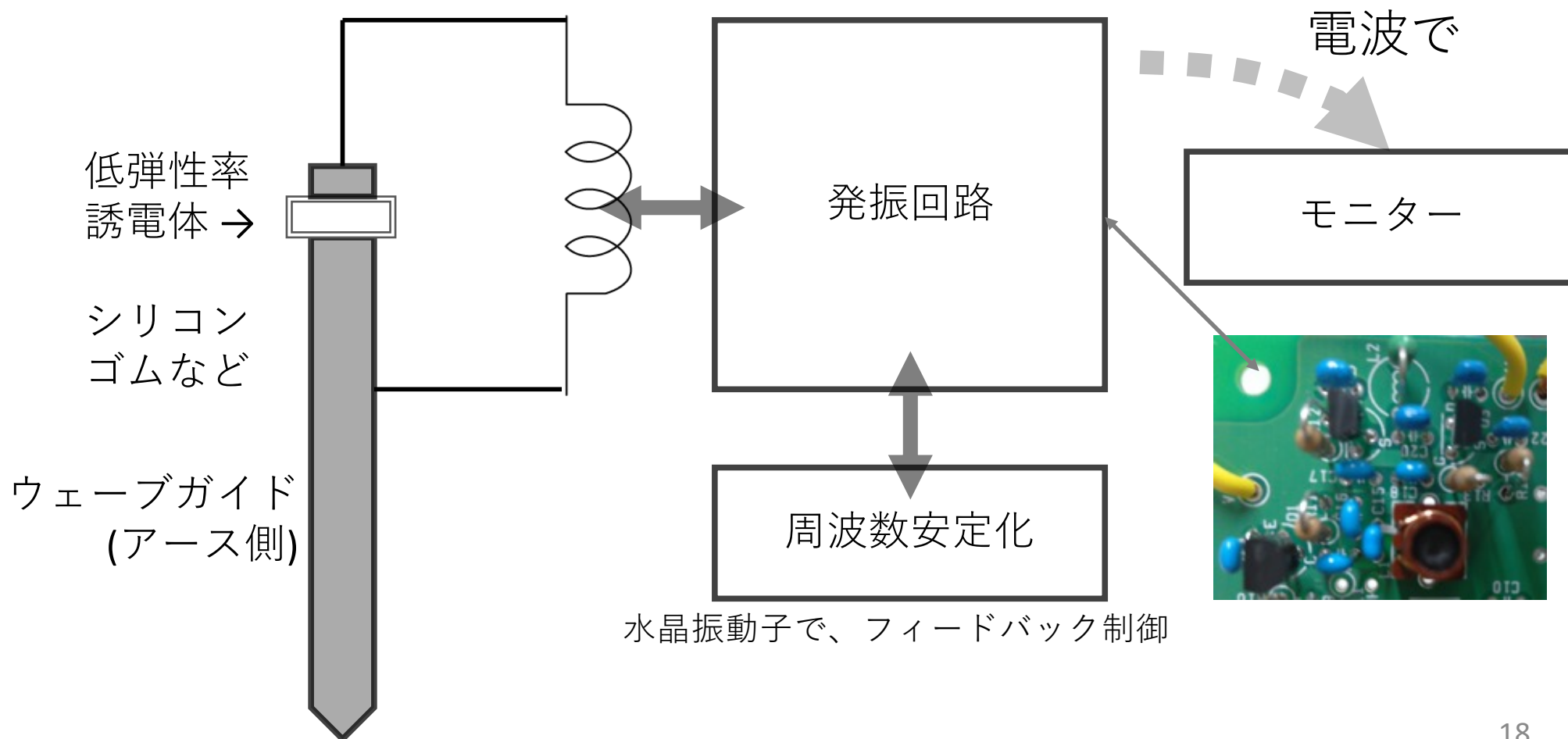
2つのチャンネルからの振動の信号(時間差から音速)
縦波、横波などの様々な振動モードの検討も要するが



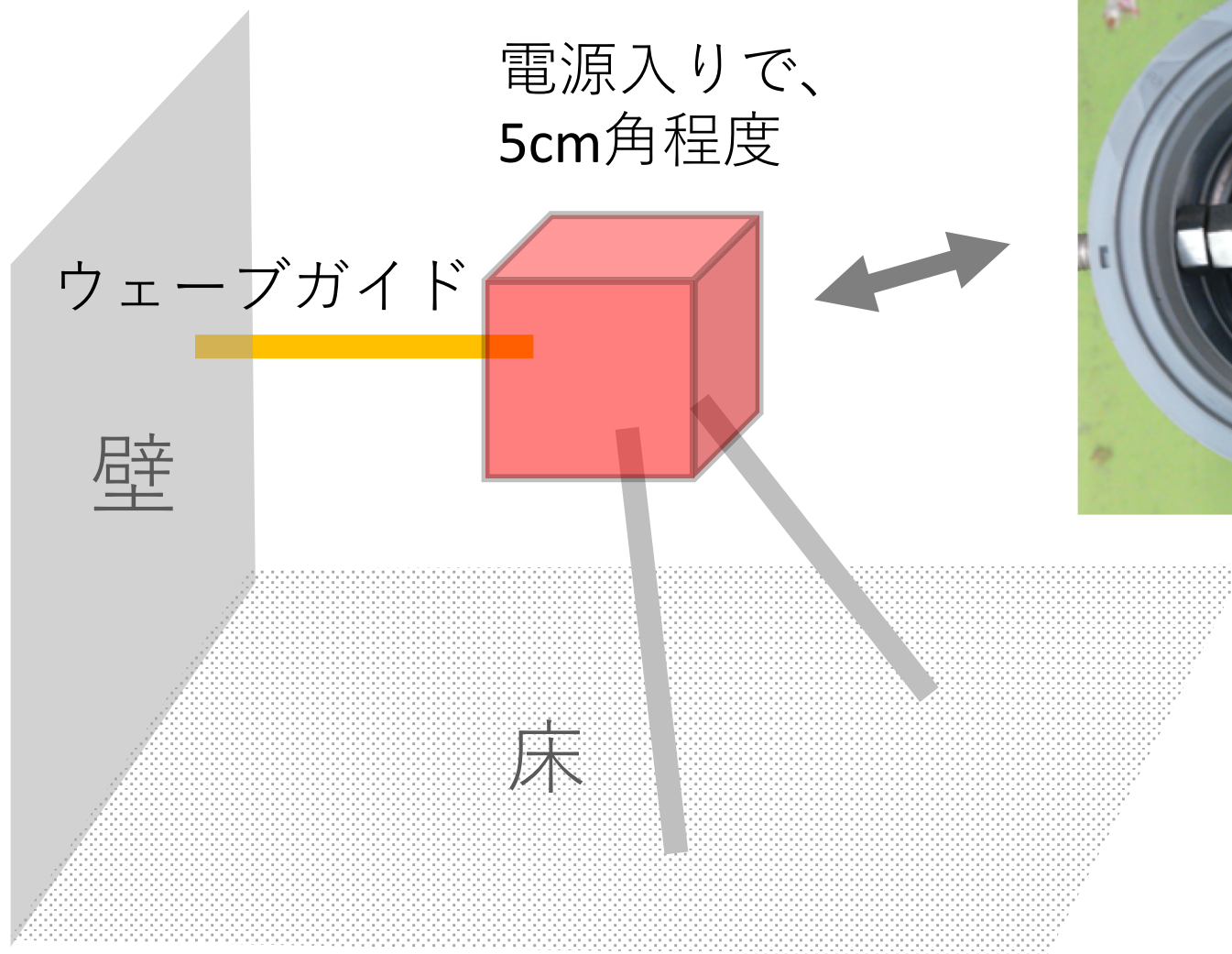
3m程度の試験体を使用(センサー間隔は1m程度とした)
妥当な音速が測定された --- 6000~7000m/s

高耐放射性振動計 --- 10kGy程度の耐放射線性は達成可能性有り

耐放射線性 アナログ式のディスクリート部品による



設置の方法例



モデル機の内内部



遠隔微小振動計に関する耐放射線性などの課題

- (i) 能動素子が耐放射線性の限界を定めるようなので、
ディスクリート素子(接合型のFET)を使用(アナログ回路とする)
- (ii) 10kGy(次図)が限界のようであり、福島第一の格納容器内(線量率 10Gy/h)では、1000時間(40日)しか継続使用できない --- >100kGyの指摘も(GAROO Lab.)
- (iii) 受動素子の耐放射線性は、問題が少ないことを確認
(電解コンデンサー、水晶発振子なども含めて ~100hGyまで評価を実施)
- (iv) センサー部分での照射によるノイズが無視できるレベルにとどまることを確認(200Gy/hまで照射下試験で評価 --- 次々ページ)

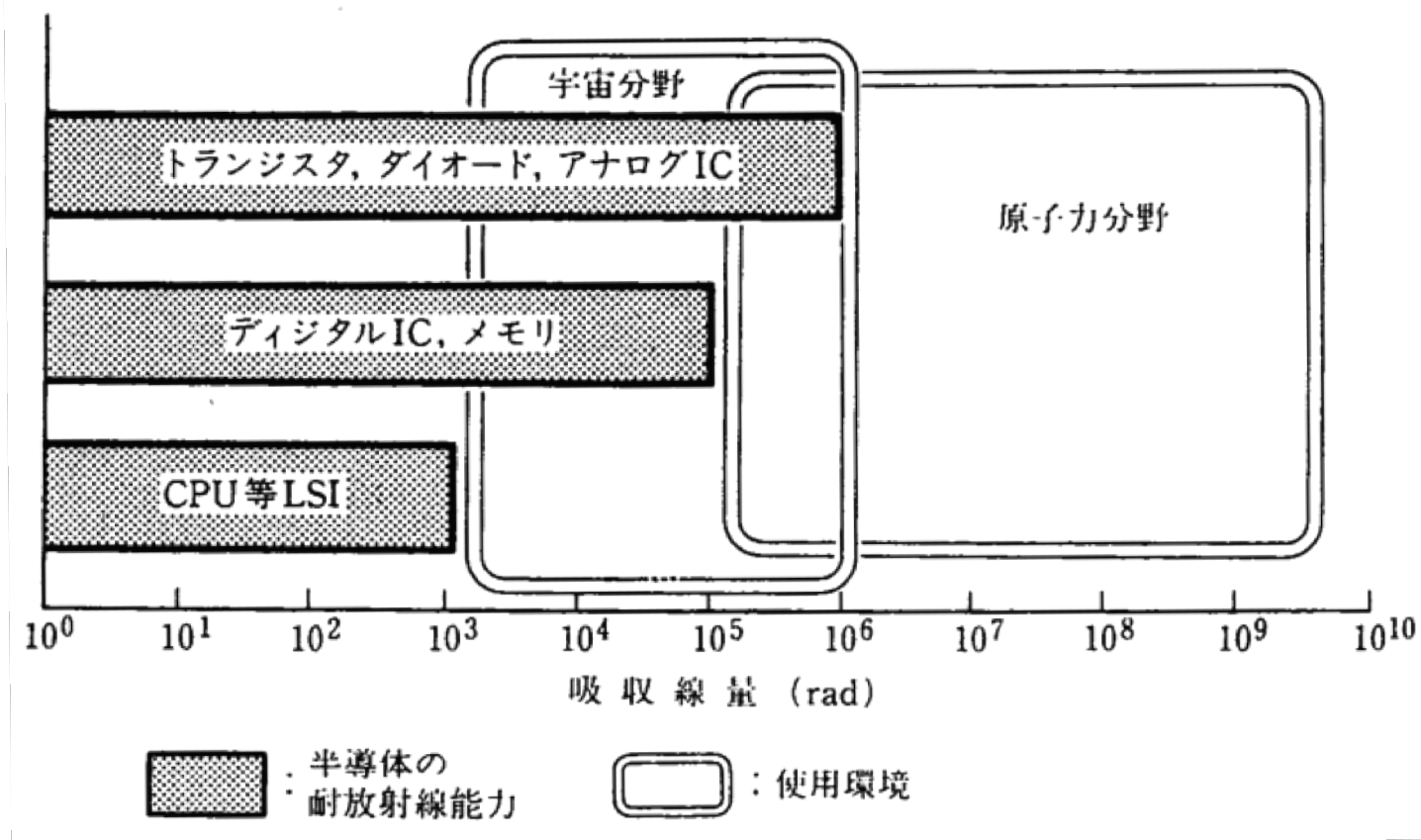
以上のように、耐照射性の評価は、総合試験を除いて実施済(問題無い)

しかし、さらに耐久性を高めるためには、能動素子の耐放射線性の向上は重要 → 集積化を想定した、微小真空管の開発も開始し、2極管特性を実現

なお、遠隔微小振動計については、次の段階として、実環境(高湿度 + ガレキ)での動作確認、音速分布の解析法の開発を要する

表1 半導体の耐放射線能力と使用環境

Radiation hardness of semiconductor and radiation

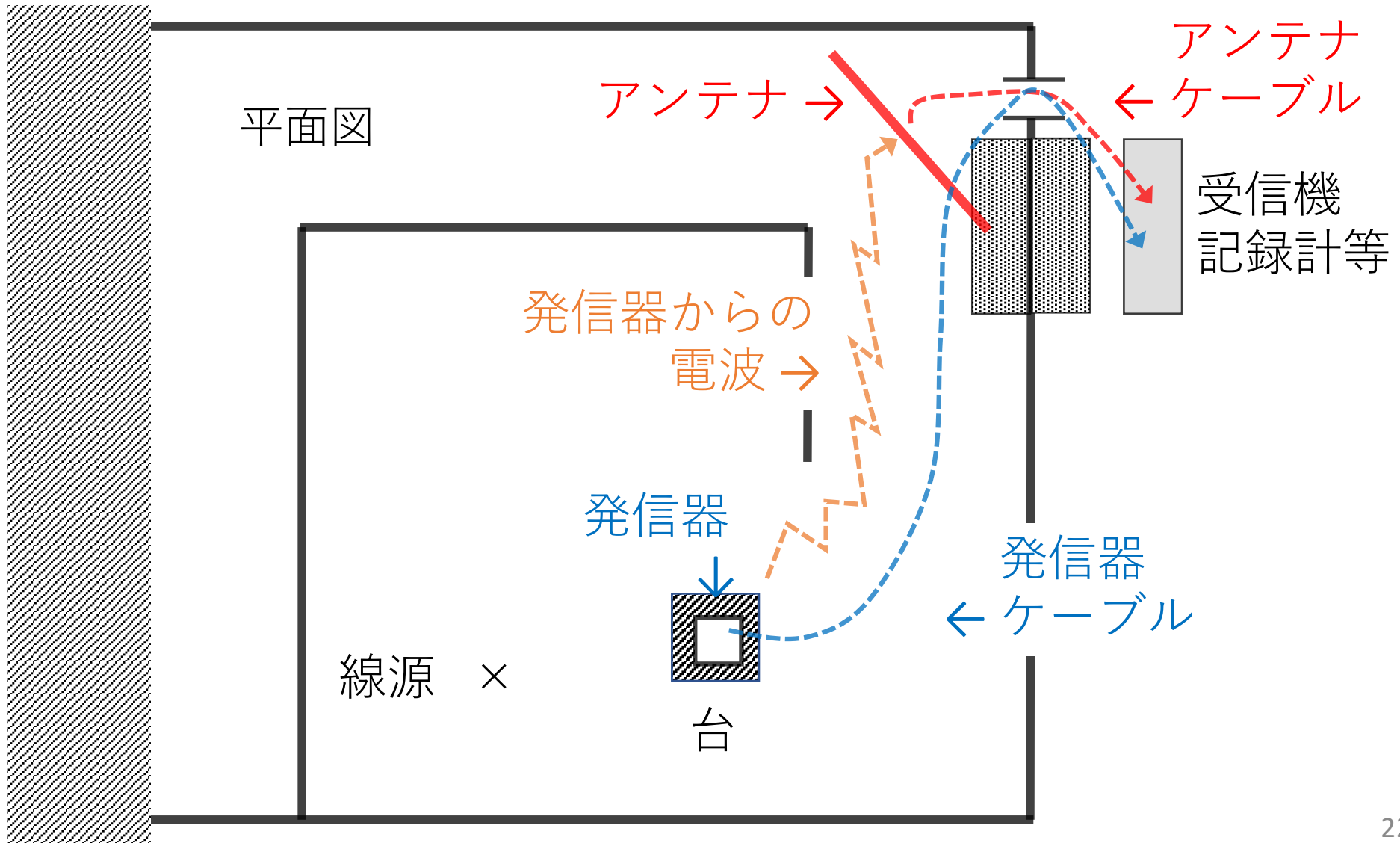


図は、三菱重工技報 1996年 vol.33 No.3、杉岡他、「耐放射線ハイブリッドICの開発」から1F2号で10Gy/hなので、10kGyの寿命とするとマージンを考えなくても1000h程度(40日)

但し、1桁程度高い積算線量でもJ-FETは、動作可能との指摘も頂戴している(GAROO Lab.)

照射下測定 の概念図

照射下の発信器(トランスデューサー付き)からの高周波を、照射室内に設置したアンテナで取り出し、照射室内に設置した受信機記録計等を



微小真空管(集積化を想定)

真空管には、カソード(電子を発生しやすい)を要する。これに、フィールドエミッションディスプレイ(FED)の電子銃のような、冷陰極が利用できれば、小型化の道もあろう。

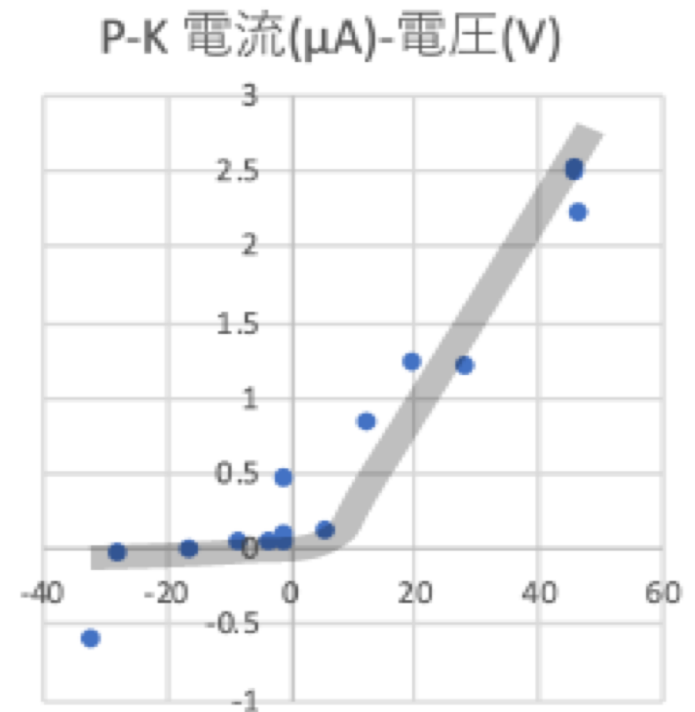
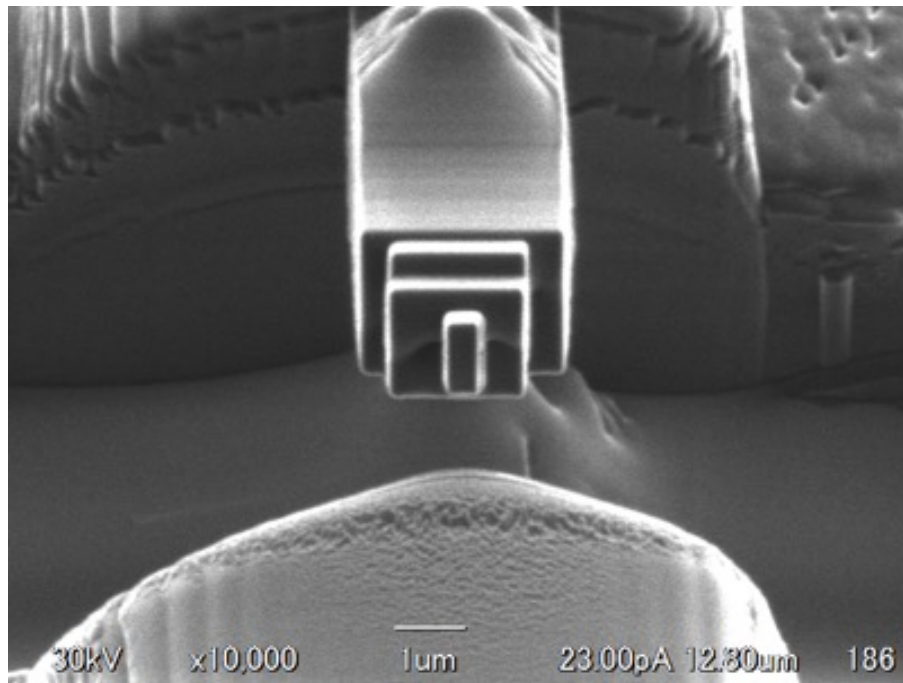
しかし、冷陰極の場合には、放射線場では、光電効果などによるノイズの問題が懸念される。

そこで、ここでは、この問題を解決するために、傍熱型のような素子を試作した。

現状では、アルミナの基板上に、複数の素子を形成し(寸法は、次ページ参照)、2極管特性を示すことを確認した。

アルミナ基板の上に作製した微小真空管

アルミナ基板の上に、蒸着などにより引出し電極を形成し、引き出し電極間に、微小真空管をFIBで形成した。
傍熱型のカソードとした。



まとめ

- (i)耐放射線性の高い遠隔センサーとして、アナログ回路による微小振動計の基盤技術を開発
- (ii)多数の微小振動計による音速/振幅分布測定を用いれば、コンクリートなどの損傷分布評価への利用可能性を示した
- (iii)微小真空管を試作し、2極管特性取得 --- 集積化が可能

今後の予定

(a) 遠隔型の微小振動計

- 熱影響などを受けた、コンクリート試験体中の音速分布と熱影響を比較
- 耐放射線性評価を含む、照射下での総合試験で、特性確認を行う微小振動計
- 炉内などへの適用に向けたパッケージを検討する

(b) 微小真空管

- 電子線源の改良(電流密度の向上など)

右は、2020年度の秋の原子力学会での
 予稿を、少し改訂したものです。

耐放射線性を考慮した遠隔型微小振動計及び能動素子の初期的検討

Development of the radiation resistant remote vibration sensing equipment for the reactor decommissioning

*實川 資朗¹

1.福島工業高等専門学校

耐放射線性を考慮して、アナログ回路による静電式の振動計を試作し、この複数個を試験体に配置して試験体に打撃を与え、検出パルス信号の時間差から、音速測定が可能な結果を得た。但し、立ち上がりタイミングの設定(閾値)にも依存した。また、さらなる耐放射線性向上及び集積化を目指し、傍熱式のカソードを用いる、小型の電子管を作製し、このダイオード特性を評価した。

キーワード：廃止措置、健全性評価、振動計測、耐放射線性、耐放射線素子

1. 緒言

福島第一原発などの、過酷事故で損傷を受けた炉の解体作業の安全性を高めるためには、材料の損傷、欠陥の発生状況の遠隔評価は有用と考えられる。構造物中の亀裂などの欠陥、或いは、事故時の加熱による材質変化(例えば、コンクリートの強度低下)は、音速などの測定結果から推定できる可能性がある。一方、機器の保守を考慮すれば、高い耐放射線性を持つ必要がある。そこで、アナログ回路(ディスクリート素子適用)を用いた、広い周波数帯域に対応できる静電式の振動計の開発を行っている。このような機器の耐放射線性を高めつつ機能を向上させるためには、素子の耐放射線性の向上は有用であり、このため原理的に耐放射線性が高く、また集積化も期待できる、小型の電子管の試作も行った。

2. 試作及び測定

2-1. 静電容量式振動計

LC回路を有する発振回路のCの一部に静電容量式のピックアップ(図1)を使用した振動計を試作した。回路の概要も示す。振動計(複数)を金属やコンクリート製の試験体に接触させ、試験体端を打撃し、検出した振動の立ち上がりの時間差を測定した。長さ3mのアルミ製の棒材(直径10mm)に、1mの間隔で配置した振動計により検出した振動波形を図2に例示する。試験体の振動(振幅から評価)は、数100から数kHzに分布した。振動波形の振幅(ピーク)に対し、例えば、20%程度値を閾値に設定して、衝撃によるパルスの開始時間を定めて時間差を求めたところ(音速測定のため)、音速は、概ね、6000m/sとなった。なお、遠隔での検出を可能とするため、LC回路による発信周波数を10MHz-100MHzに設定した(ここでは80MHz付近を使用)。

2-2. 小型電子管

冷陰極型であれば、FEDのように、微小な電子管は可能と思われるが、放射線場で用いる場合、光電効果などの影響を想定すれば、より安定した電子線源を要するであろう。そこで、傍熱式で、かつ引出し電圧を加えたカソード(陰極)を用いた小型の電子管を試作した(例を図3)。プレート(陽極)-カソードの間の電流-電圧関係の例も示す。このように、非線形のダイオード特性を示した。素子の中心領域の大きさを、差し渡し10μm程度とした(さらなる小型化も可能)。

3. 結果

静電容量式振動計で、音速測定が可能な結果となった。機器の照射下性能の総合評価を要するが、機器の実現可能性は得られたと考える。小型電子管についても、微小な傍熱式能動素子の実現性が示された。

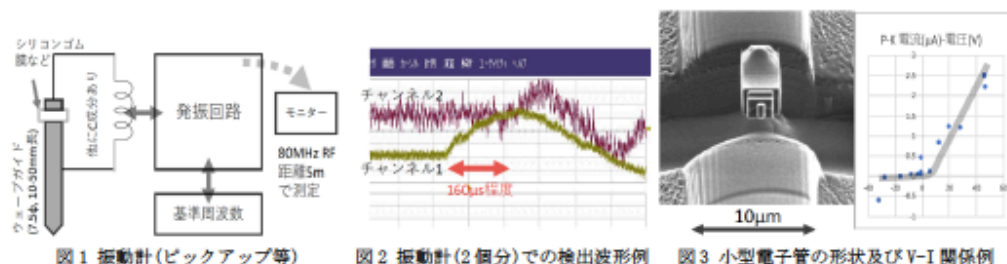


図1 振動計(ピックアップ等)

図2 振動計(2個分)での検出波形例

図3 小型電子管の形状及びV-I関係例

* Shiro Jitsukawa¹, ¹NTT Fukushima college