

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業
—課題解決型廃炉研究プログラム—



視界不良・高線量下での空間認識のための
超音波可視化技術

事業代表者

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 林高弘

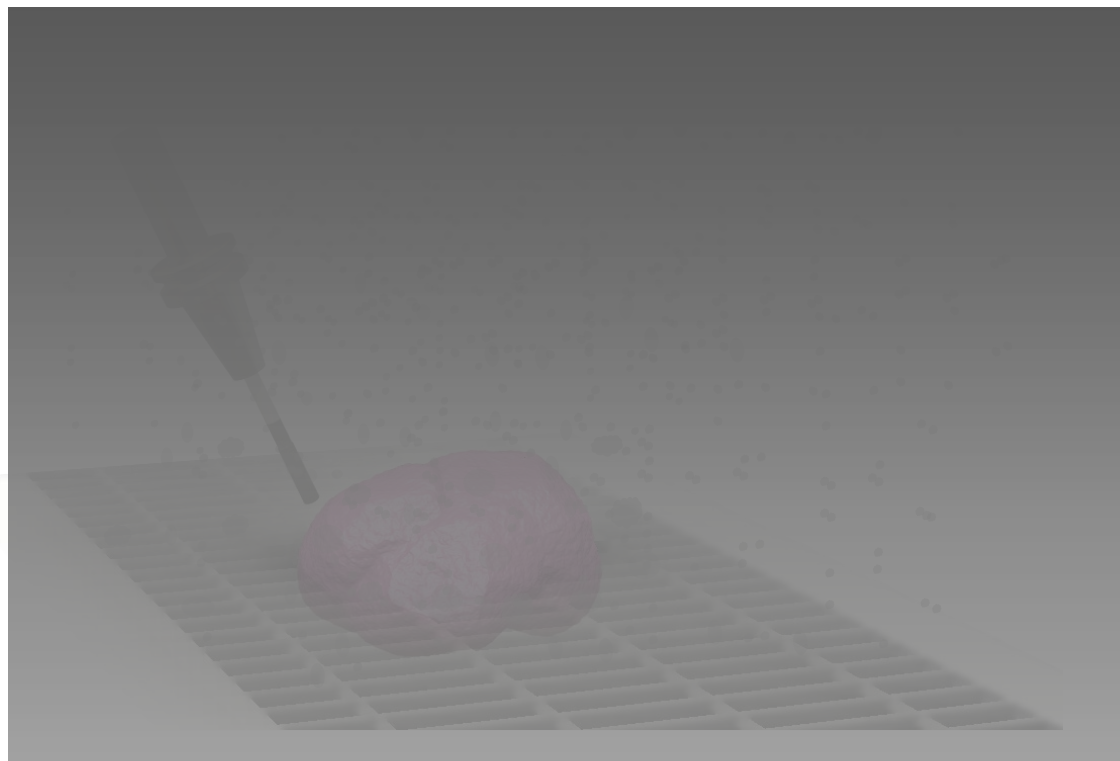
大阪大学 森直樹, 沖田隆文, 村田勲, 佐藤文信, 帆足英二, 玉置慎吾

日本大学 大隅歩

東北大学 小原良和

特定ニーズ：

高線量（PCV/RRV内）かつ視界不良環境においても内部環境を可視化できる、
耐放射性を有する超音波計測技術



福島第一原子力発電所 1号機
PCV内部調査について
（ROV-A2調査3日目その1）



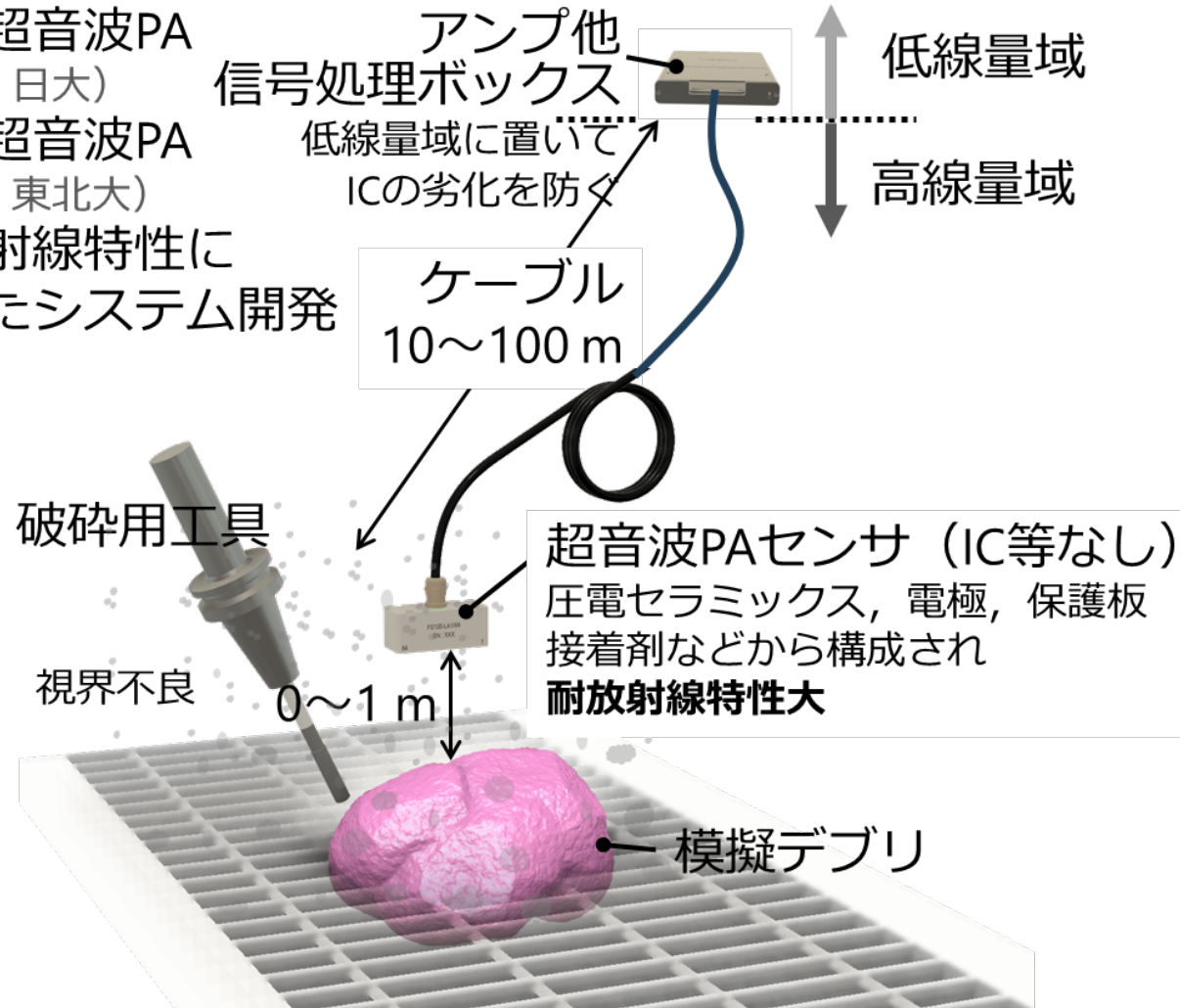
目的

視界不良・高線量下における空間認識技術として、
超音波フェイズドアレイ（PA）による可視化手法を確立する

研究目標の妥当性

達成目標

- ◆ 空中超音波PA
(阪大, 日大)
- ◆ 水中超音波PA
(阪大, 東北大)
- ◆ 耐放射線特性に
優れたシステム開発
(阪大)

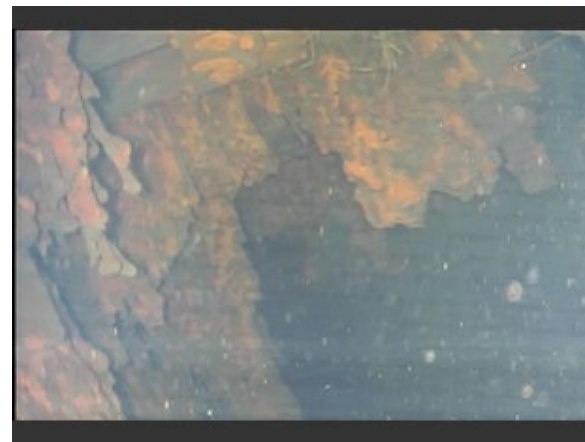
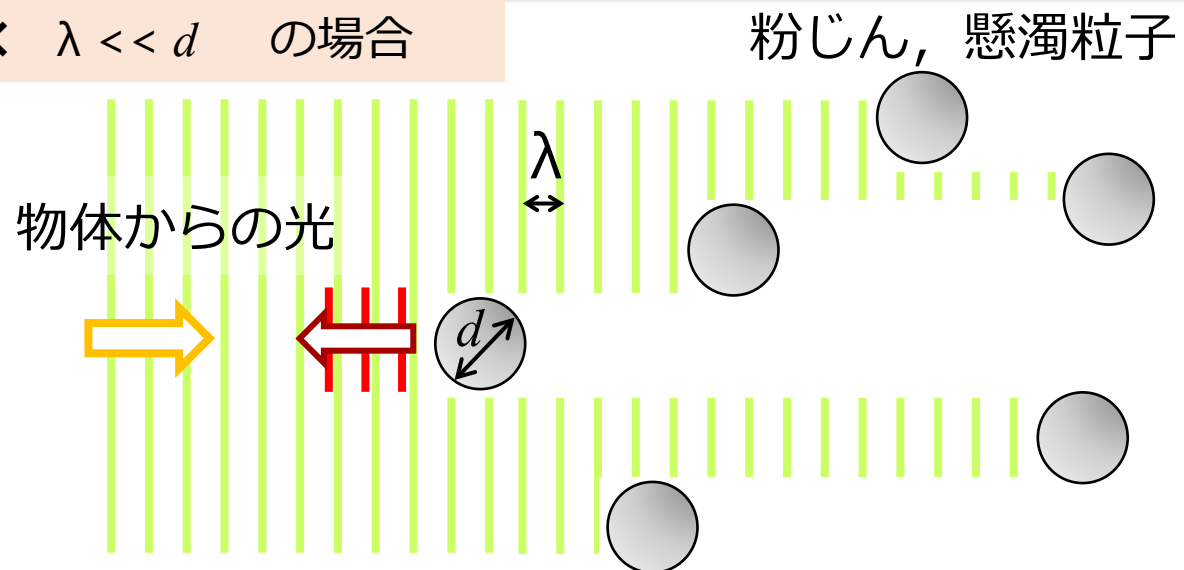


- 視界不良な環境において,
水中, 空中いずれの場合でも,
5 mm以下の空間分解能による可視化
- 超音波センサ部が
線量率1kSv/hでも動作し,
積算線量10 MGy (約400日に相当) で
も使用可能であることを確認

研究内容の新規性

波長 回折 透過性

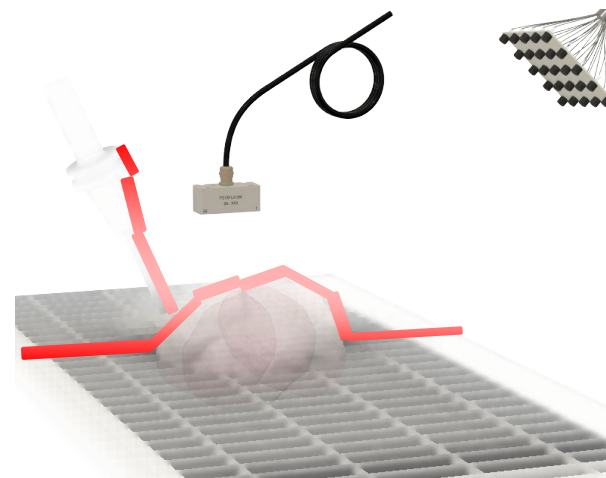
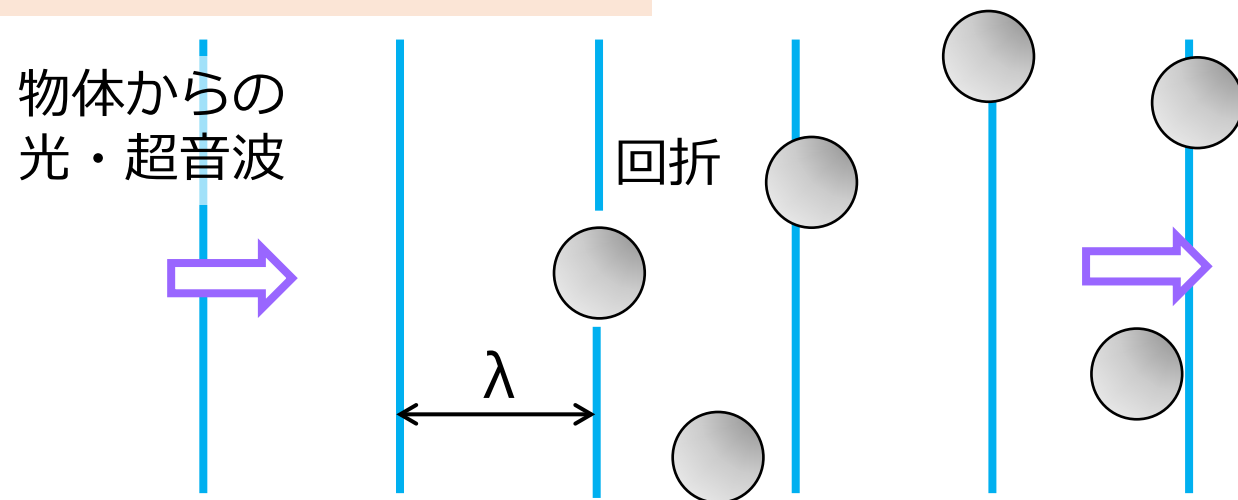
× $\lambda \ll d$ の場合



粉じんや懸濁粒子で
濁って見えない

遮光

◎ $d < \lambda < \text{物体}$ の場合



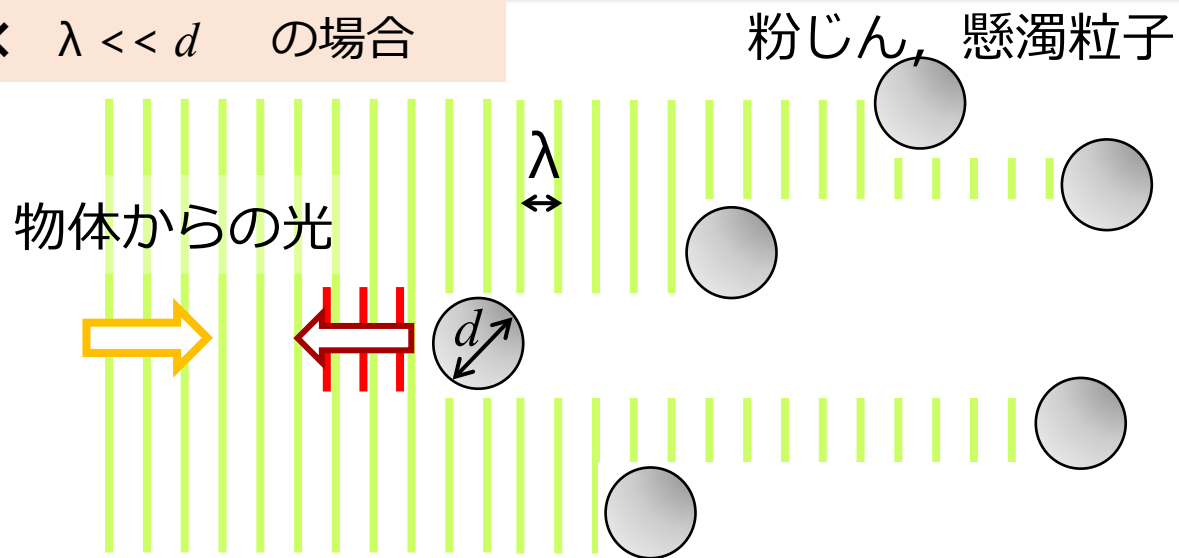
物体認識可

ただし分解能,
視野が減少

研究内容の新規性

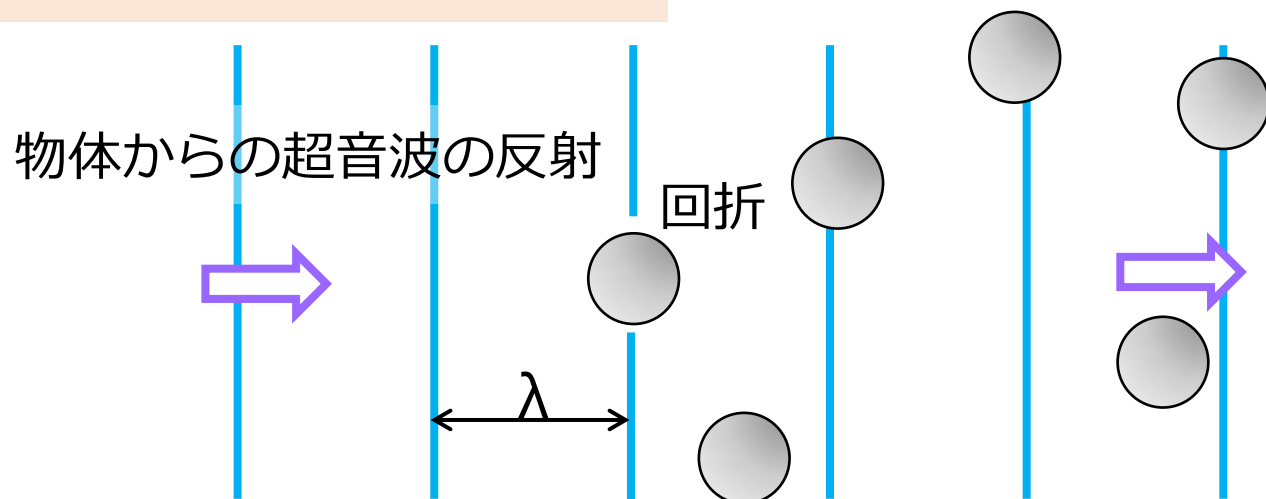
波長 回折 透過性

× $\lambda \ll d$ の場合



カメラ (可視光) $\lambda = 0.4 - 0.8 \mu\text{m}$
 LiDAR → 赤外線レーザー $\lambda = 1 - 2 \mu\text{m}$

◎ $d < \lambda < \text{物体}$ の場合

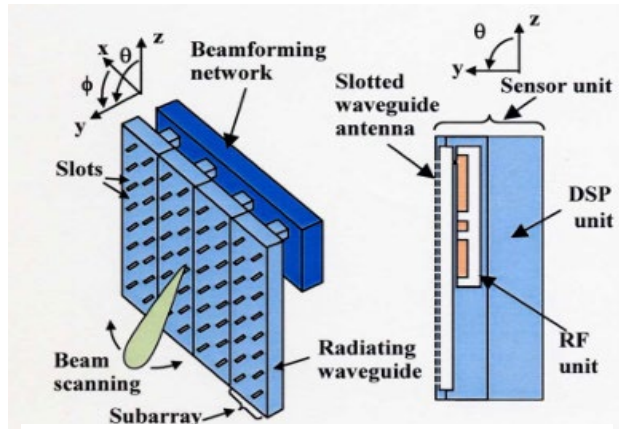


ミリ波レーザー $\lambda = 4 \text{ mm}$ 程度 (76 GHz帯)
 超音波 空中 $\lambda = 10 \text{ mm}$ 程度 (40 kHz)
 水中 //

研究内容の新規性

ミリ波レーダー vs 超音波

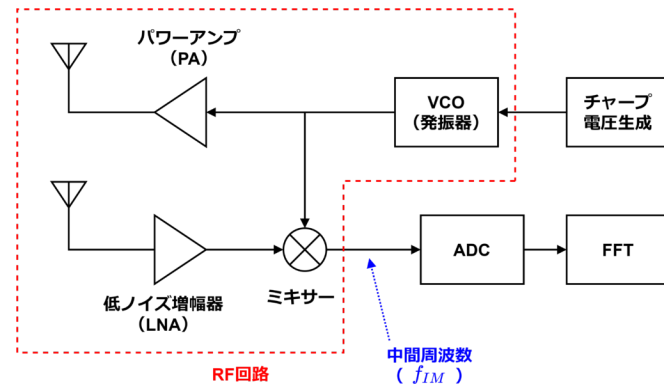
ミリ波レーダー



R&D Review of Toyota CRDL Vol. 36 No. 3 (2001.9)



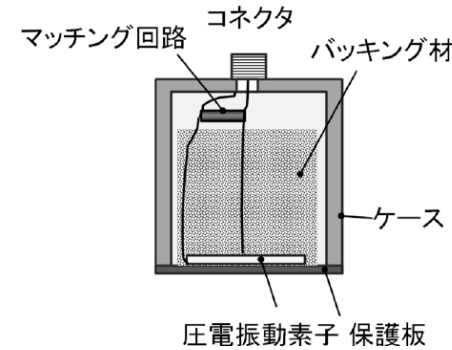
プリウス用ミリ波レーダー
横方向長さ 100 mm程度



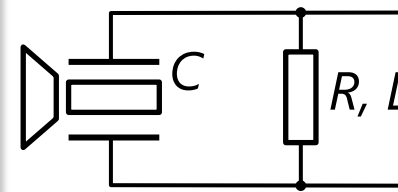
https://study-robot.jp/sensor/millimeter_wave_radar/

76GHz 帯 → アンテナ, 増幅器などは一体
多くの半導体素子は放射線に弱い

超音波



超音波による非破壊材料評価の基礎,
林高弘, 2021



40 kHz – 1 MHz

ミリ波レーダーの1/10000以下

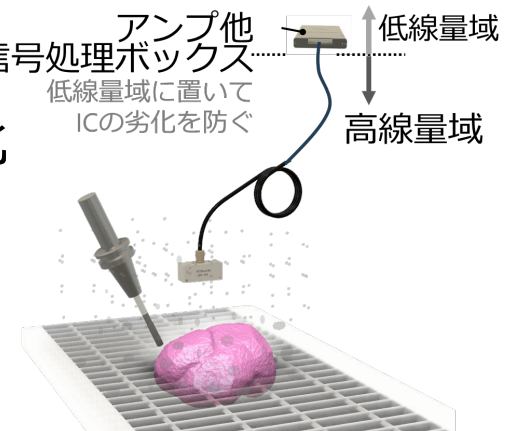
ICなしで製作可

放射線に弱い箇所がほとんどない

超音波の採用がベスト
超音波フェイズドアレイで可視化

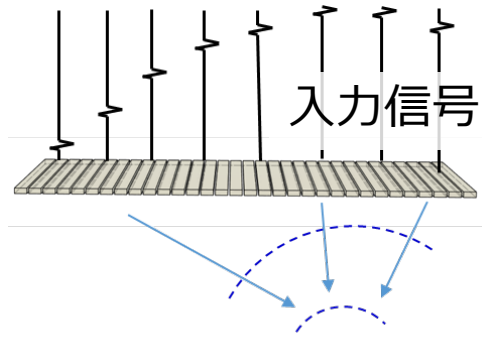
個々の研究項目ごとの
新規性はここでは省略

信号処理ボックス
低線量域に置いて
ICの劣化を防ぐ



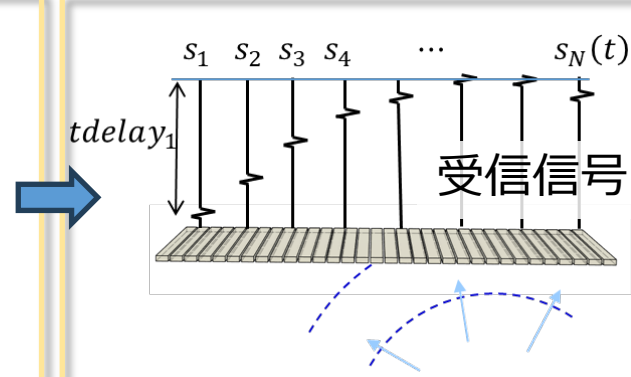
用語の説明

超音波フェイズドアレイ(PA)



送信

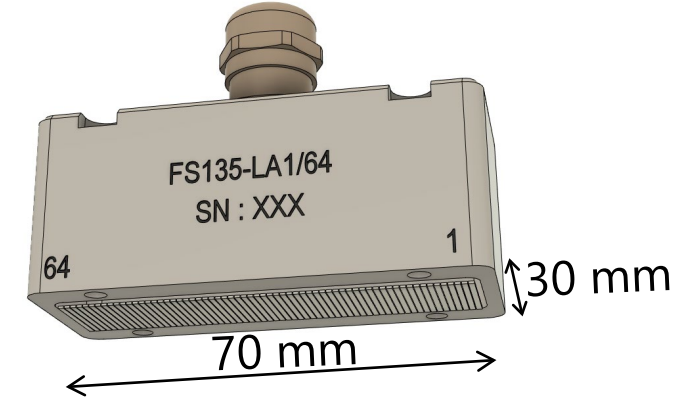
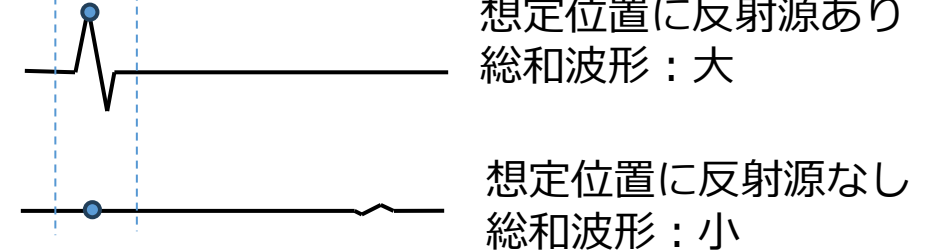
各素子に適切な遅延を与えた信号を出力すると、想定位置に超音波を集束できる。



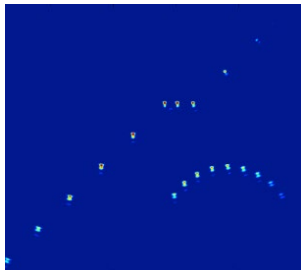
受信

もしフォーカス点に反射源があればエコー信号が存在.
その場合、受信信号には同心円状の遅延が想定される

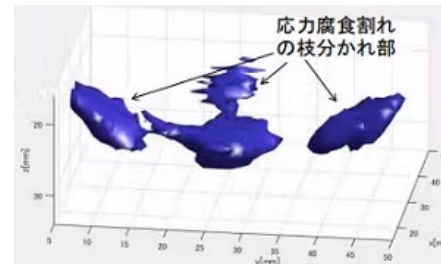
$$\sum_i s_i(t - t_{\text{delay}_i})$$



フォーカス点の走査，想定反射源の走査を行い，得られる値をプロットすると画像が得られる



← 金属中の横穴を検出した
デモ画像 直径1mm以下



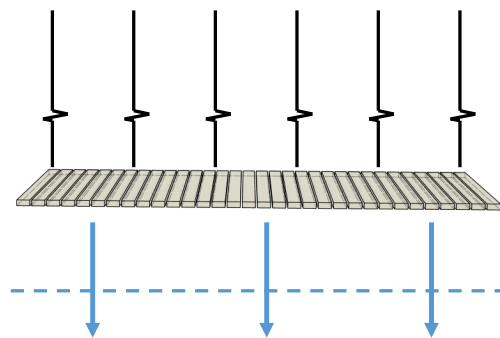
← 再委託先
東北大 小原研での成果

応力腐食割れ枝分かれ部の
3次元画像化

用語の説明

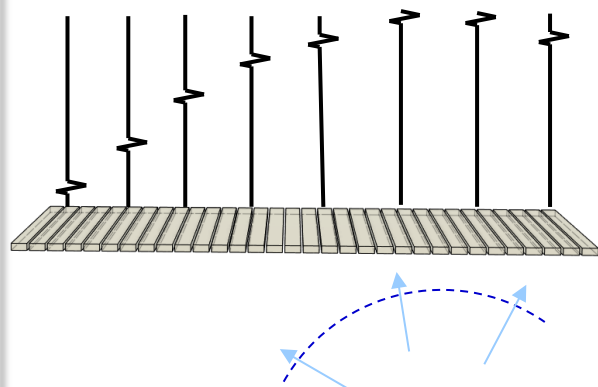
超音波フェイズドアレイ(PA)

PWI (Plane Wave Imaging)



送信

同時に 1 回送信
平面波



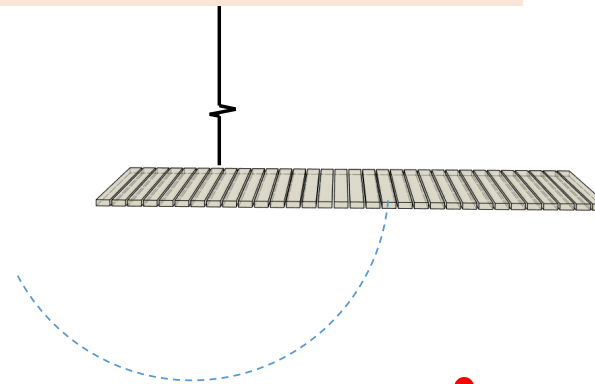
受信

同時に全素子で受信
PC内で波形処理

高速処理が可能

懸濁粒子, ダストの影響を除去する実用的な手法の開発

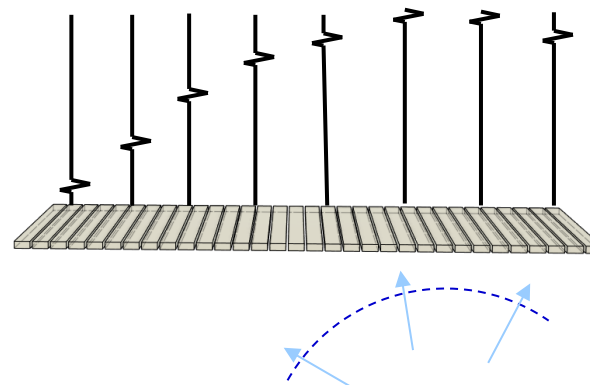
FMC (Full Matrix Capture)



送信

1素子ずつ個別に

チャンネル数(N)分だけ
送受信を繰り返す



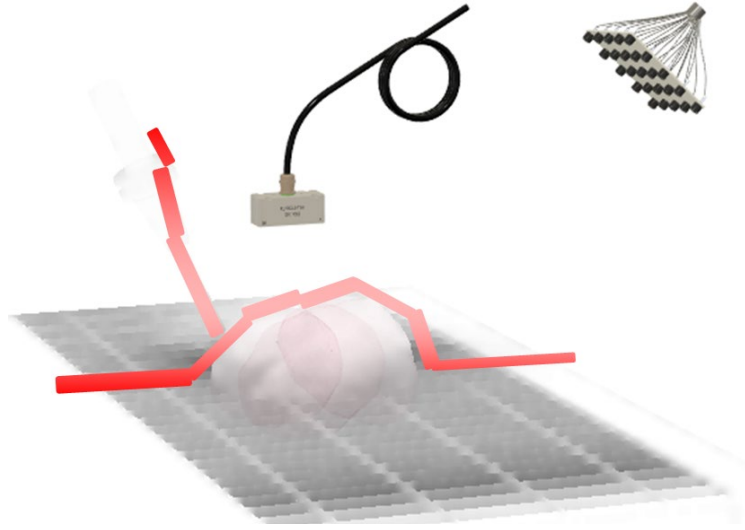
受信

同時に全素子で受信
PC内で波形処理

より鮮明に画像化が可能

$N \times N$ の全情報を利用する

研究効果、発展性等



主要課題

- 可視化による燃料デブリ粉砕作業の効率向上

本提案の副次的な効果

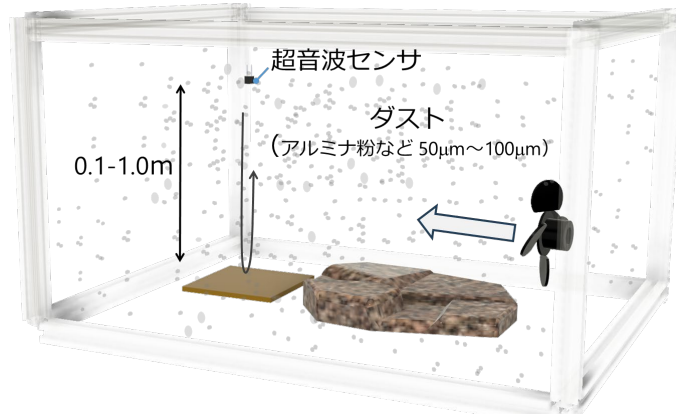
- 燃料デブリの常時状態監視
- 水中の場合には、対象物体の材料特性（弾性定数）の評価

他分野や異なる用途への発展性

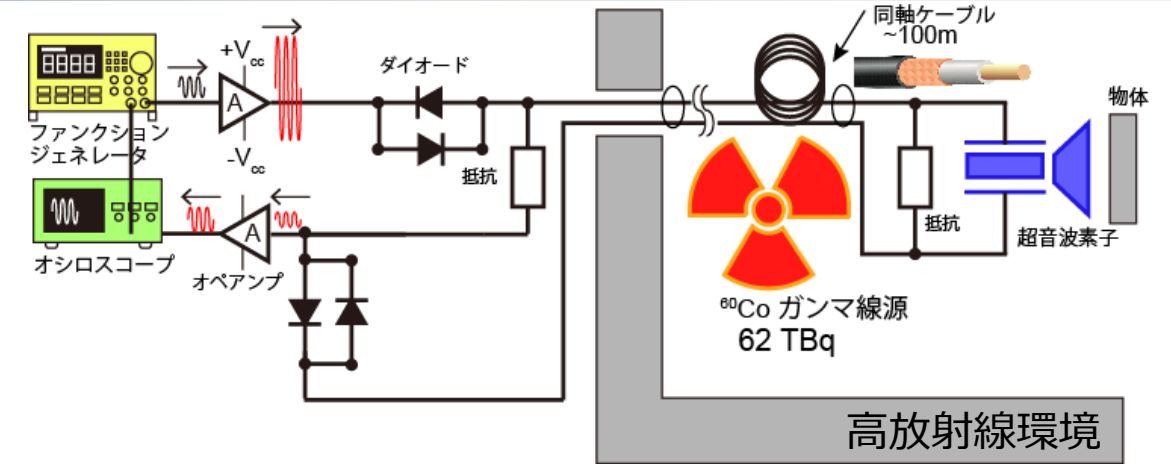
- 超音波バッファの開発（阪大） → 高温，極低温への超音波PAの適用
種々のプラント，新型原発プラントのモニタリング
- 空中超音波PA（日大） → あらゆる空間可視化への展開
- 高フレームレートPAによる可視化スキーム構築（東北大） → 空間内の多数のノイズ源に打ち勝つ
新しい空間認識技術
- 高強度ガンマ線環境に対する超音波計測手法（阪大） → 耐放射線性に強い超音波システム
新しい前置増幅器

研究計画

1 年目



ダスト，懸濁粒子環境



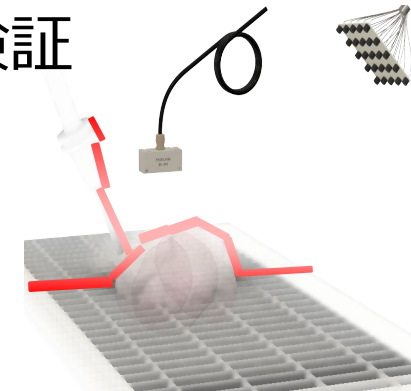
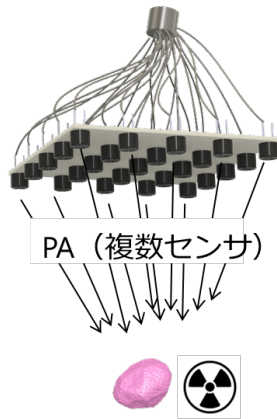
PAシステム設計のための基礎データ取得
水中，空中PA仕様の決定，

高線量耐性の確認

2 - 3 年目

超音波PAによる可視化実験/ 耐放射線性の検証

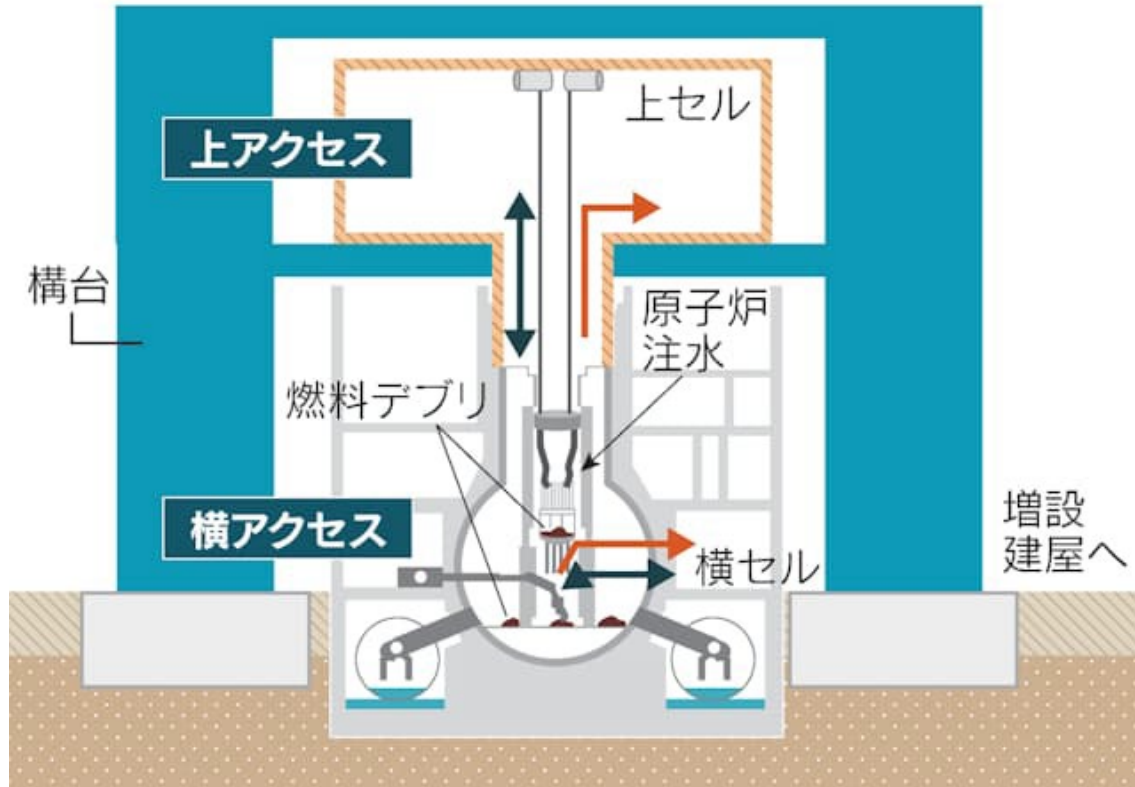
視界不良下・高線量下での可視化実験



研究成果の1Fへの実機適用イメージ

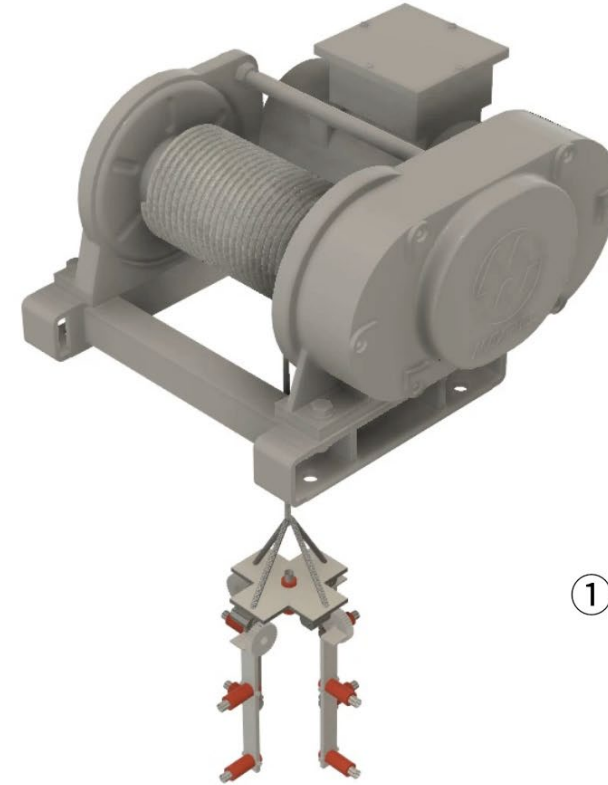
気中工法

燃料デブリが露出した状態で水をかけ流しながら取り出す



日経新聞電子版より

動画



- ① 超音波センサアレイをウインチでおろす

(赤が超音波センサ)