

平成30年10月2日  
原子力委員会定例会

# 加速器小型化の最前線について

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻  
上坂充

# 講演内容

1. はじめに
2. 加速器の小型化
3. 950keV/3.95/6MeV X線/中性子源による  
産業社会インフラ診断・  
福島燃料デブリ分析応用
4. 卓上レーザー加速器の放射線生物学応用
5. まとめ

# 大型加速器プロジェクトと小型加速器

国際リニアコライダー (ILC) ・  
超電導加速器



核変換用陽子加速器 (IMPACT・理研)

スタンフォード  
線形加速器センター・  
高エネルギー加速器研究機構・  
CERN (CLIC) によるXバンド (9-  
12GHz)  
電子ライナック (かつて常温ILC)



X線定位がん治療用サイバーナイフ  
可搬型Xバンド電子ライナックX線・  
中性子源

レーザープラズマ加速・  
レーザー誘電体加速  
(ILCのバックアップ)



卓上レーザー誘電体加速  
DNA損傷修復観察システム

X線自由電子レーザー (SACLA) による  
Cバンド (5.712GHz) 電子ライナック



CT合体型動体追跡X線治療装置  
(日立)

J-PARCでの陽子ライナック



加速器BNCT  
(ホウ素中性子捕捉がん治療)<sup>3</sup>

# 実用加速器システムの内訳

加速器

ビーム検出系

コンピュータ  
制御系

ユーザ  
インターフェース

**エンドユーザのニーズの反映が重要**

# 講演内容

1. はじめに
2. **加速器の小型化**
3. **950keV/3.95/6MeV X線源による  
産業社会インフラ診断・  
福島燃料デブリ分析応用**
4. **卓上レーザー加速器の放射線生物学応用**
5. まとめ

# 放射線治療システムの小型化・高度化

## ガントリ型(Sバンド)



電子ライナック  
X線源



<http://www.accuray.com/>



<http://www.accuthera.com/>



## CT一体型(Cバンド)

## ロボットアーム型(Xバンド(高周波化))

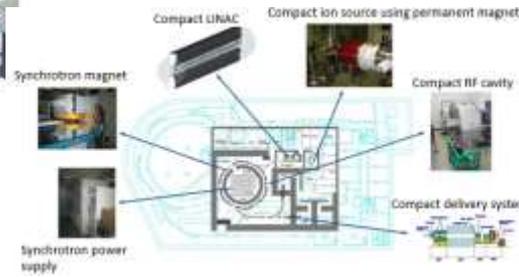
<http://www.varian.com/>

<http://www.accuray.com/>

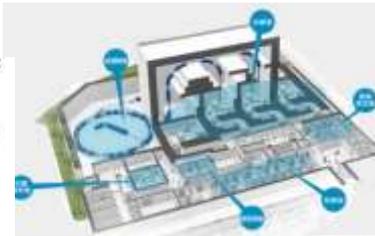
<http://www.mhi-global.com/index.html>

シンクロトロン  
陽子

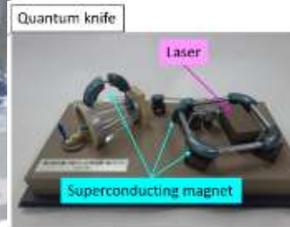
炭素



## 配置の最適化

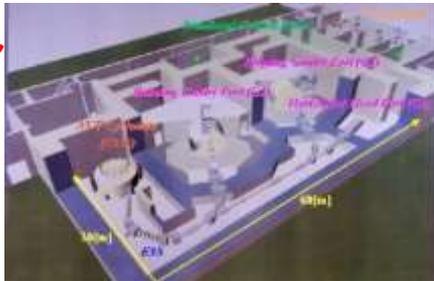


## 超伝導



<http://www.nirs.go.jp/ENG/core/ace/index.html>

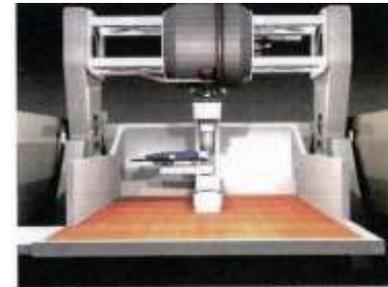
サイクロトロン  
陽子



[http://w3.ai-hosp.or.jp/ptc/prot on\\_therapy\\_center.html](http://w3.ai-hosp.or.jp/ptc/prot on_therapy_center.html)

[https://www.toshiba.co.jp/about/press/2015\\_11/pr1001.htm](https://www.toshiba.co.jp/about/press/2015_11/pr1001.htm)

TOSHIBA



## 超伝導

Review of Accelerators for Science and Technology, Vol.2(2009),p.154

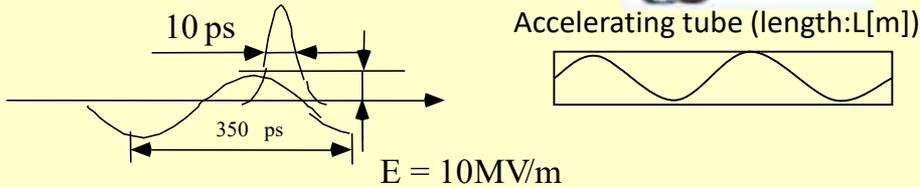
Mitsuru Uesaka and Kazuyoshi Koyama, "Medical applications for advanced acceleration concepts", Technology and applications of advanced accelerator concepts, Volume 9, *Reviews of Accelerator Science and Technology* (RAST), World Scientific, pp.-(2016).



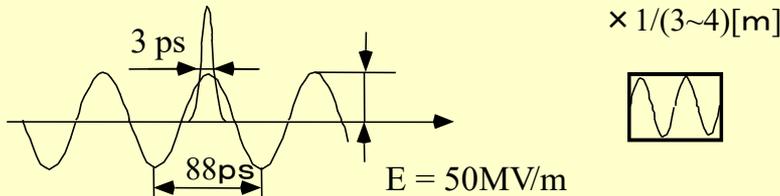
# 電子ライナックの高周波化とダウンサイジング



S-band  
Conventional  $f = 2.856\text{GHz}$



C-band  
X-band  
Linear Collider  $f = 9.3\text{-}11.424\text{ GHz}$



Ka-band  $f = 30\text{GHz}$  RF Limac

**T (Kinetic Energy)**

$$= E \text{ (Electric field)} \times L \text{ (length)}$$

$$J \text{ (Input RF power)} = E^2 V \text{ (volume of accelerating tube)}$$

$$f \text{ (RF Frequency)} \propto V^{-n}$$

T : fixed

J : fixed

shorter L

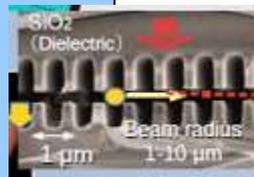
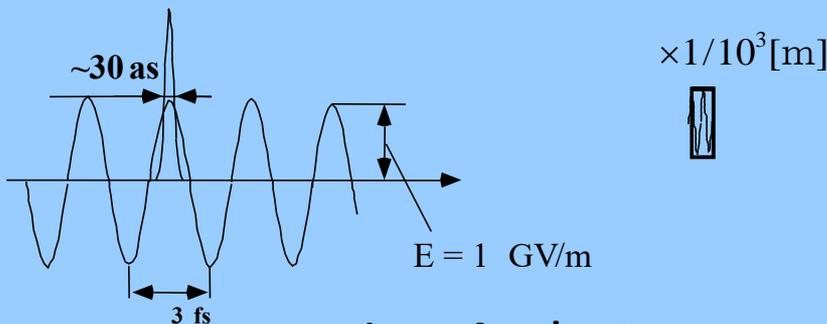
larger E

smaller V

higher  $f$  (shorter RF wavelength)

Short pulse generation

Laser Dielectric Accelerator  
Yr laser  $\lambda = 1\mu\text{m}$ ,  $f = 100\text{THz}$



Laser Accelerator

# 東京大学における3ステージ小型加速器開発

平成31年3月に東大ライナック施設40周年記念式開催予定

## Sバンド(2.856 GHz)フェムト秒ツインライナック



ピコ秒ライナック・レーザー同期による原子炉水・超臨界圧水化学分析システムの確立

Femtosecond Beam Scienceの創成

## 小型・可搬型Xバンド(9.3-11.424GHz)ライナックの開発のその場検査開始



医療イメージング用  
コンプトン散乱単色X線源



各種プラントその場検査用  
950keV X線源



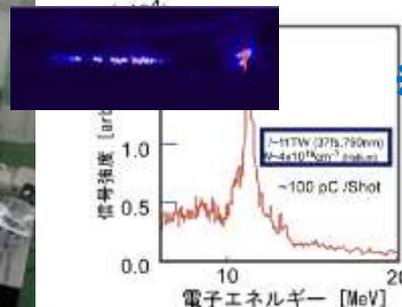
橋梁その場検査用  
3.95MeV X線源



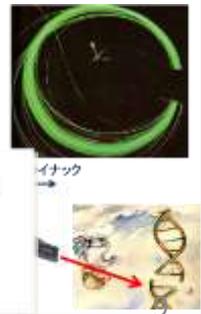
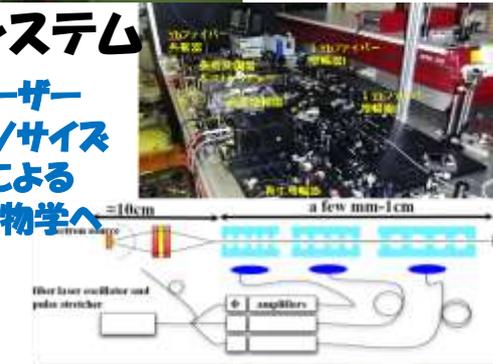
ピンポイントX線がん  
治療用6MeV X線源

### 12 TW 50 fs Laser

### レーザー(400THz)加速システム



ファイバーレーザー  
光ライナック+ノサイズ  
電子ビームによる  
先進放射線生物学へ



# 講演内容

1. はじめに
2. 加速器の小型化
3. **950keV/3.95/6MeV X線/中性子源による  
産業社会インフラ診断・  
福島燃料デブリ分析応用**
4. 卓上レーザー加速器の放射線生物学応用
5. まとめ

# X線可視化・構造解析に基づく、橋梁の耐荷力評価システム 11

- ◆ 通常の検査技術では判断が困難な部材深部における内ケーブル破損に対して、X線技術により可視化を行い、残存耐力を正しく評価する技術を確認する。→**可視化情報に基づく耐荷力推定のプロセスを一元化**
- ◆ 高速道路など舗装切削前に床版土砂化の程度が把握できると出戻りが少ない→**可視化情報の活用**

深刻な損傷の発見



↑ グラウト未充填の疑い

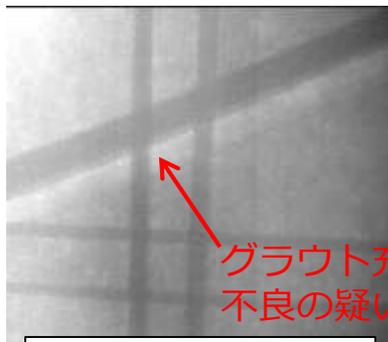


↑ 外観では判断できない鋼材の腐食が進んでいる可能性

高出力X線の可視化

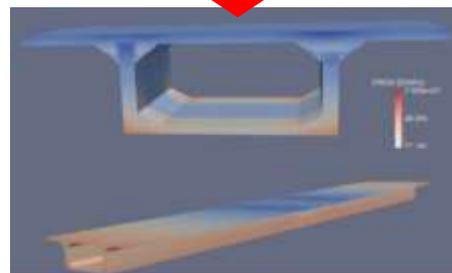


↑ 橋梁点検車を使用したX線による可視化に成功



X線による可視化

耐荷力評価



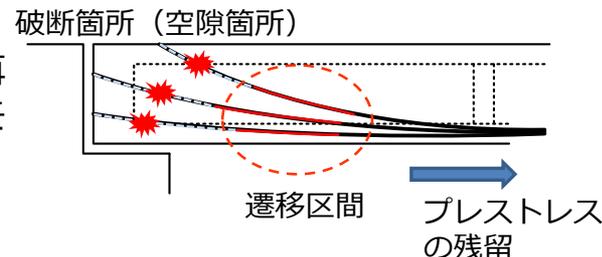
↑ 可視化情報に基づく解析手法の確立

→ ケーブルの再定着の情報をモデル化。

補修・補強方法の選定

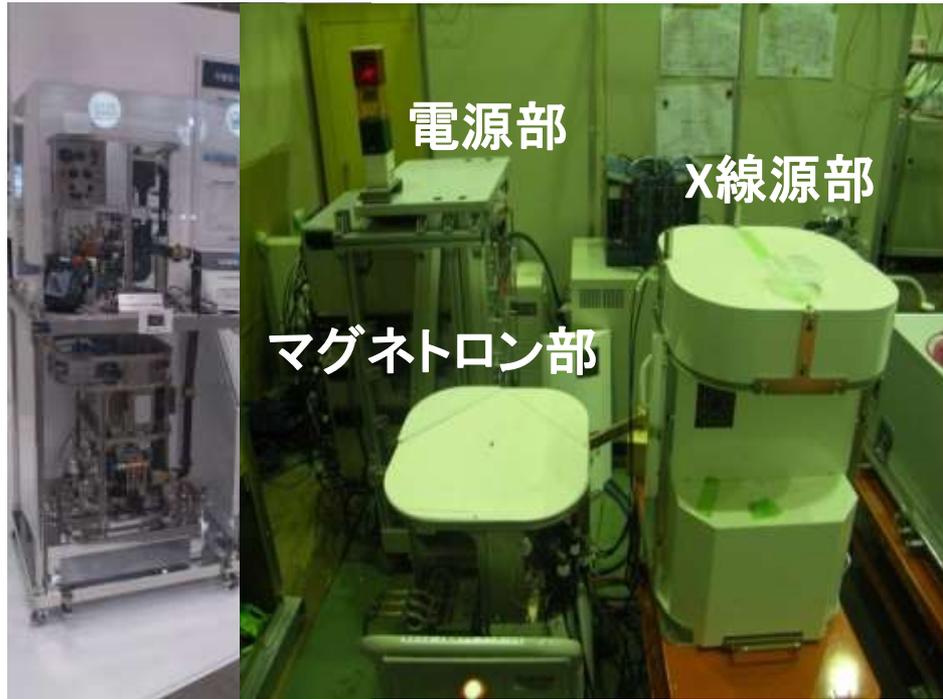
■ マニュアル(案)の作成  
X線の可視化と構造解析による耐荷力推定の一連のプロセスをマニュアル化し、既設PC橋の維持管理手法の体系に位置づける。

■ 診断技術の高度化  
Xグラウト未充填や鋼材腐食のX線画像をデータベース化する。



# 可搬型950keV XバンドドライナックX線源

超小型電子銃から発生した電子はXバンド(9.3GHz)超小型電子ビーム加速管で加速 ターゲットに衝突 X線50mGy/min@1mを発生



## 主要仕様

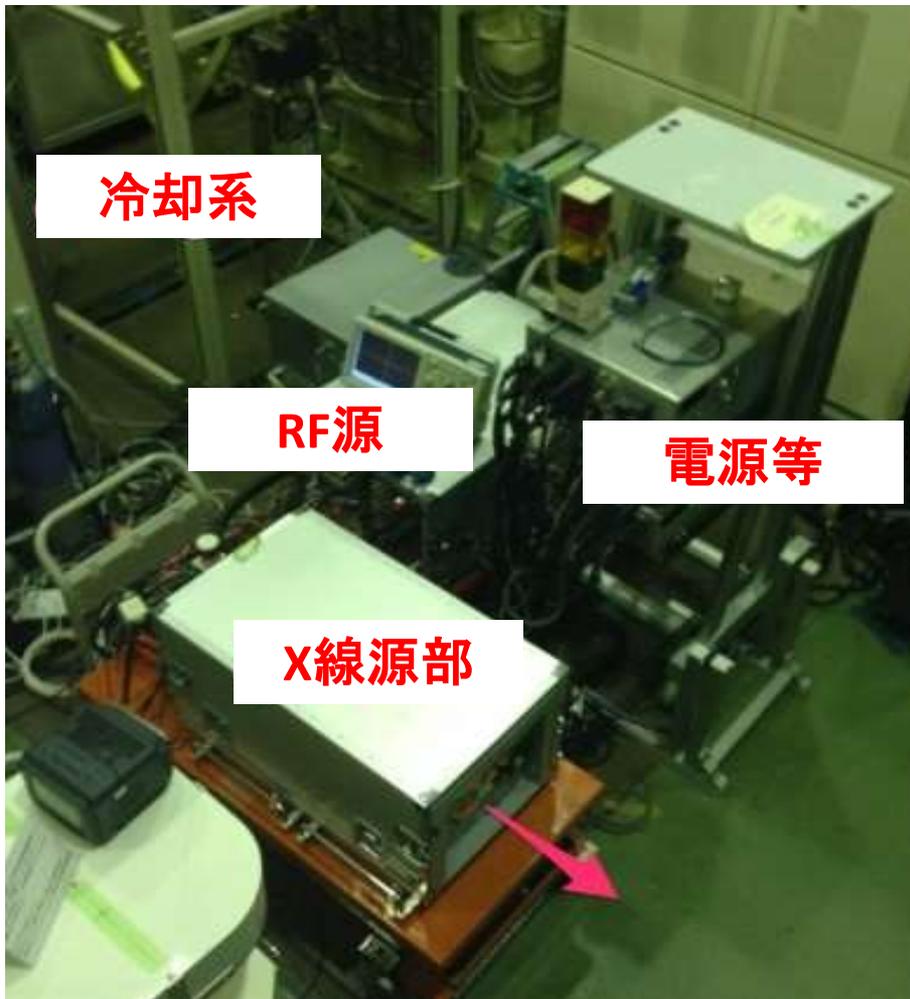
運転周波数	9.3 [GHz]
RF源	マグネトロン
入力RF電力	250KW
パルス幅・繰返数	3 [ $\mu$ s]、330 [PPS]
加速管全長	25 [cm]
ビーム電流	64mA以上
電子ビーム集束方式	RF集束方式
X線発生強度	50 [mGy/min] at 1 [m]
電子銃電圧	20KV
電子銃	三極管

3ユニットでの構成: 電源ユニット・冷却水系,

X線発生部, RF部(9.3GHz マグネトロン)

↑1ユニット当たり約50kg=可搬性を実現

# 可搬型3.95MeV XバンドドライナックX線源



## 装置仕様

RF加速空洞 共振周波数	9.3 [GHz]
電子ビーム収束方式	RF集束方式
X線発生強度	2,000 [mGy/min]以上 at 1 [m]
RF発生源	9.3[GHz]マグネトロン 1.3MW, パルス幅4[ $\mu$ s] 繰返数200[PPS]
電子銃出力	パルスピーク電流 電圧35kV 300 [mA]以上
出力方式	コンデンサ充電スイッチング方式
X線ヘッドユニット 重量	62kg
コリメータ重量	80kg
高周波源ユニット 重量	62kg
HVPS,制御ユニット 重量	116kg

950keV X線源と比較→X線発生強度 40倍

橋梁, コンクリート構造物を検査対象として開発

# X線発生装置の屋外使用における法順守

## 950keV X線発生装置

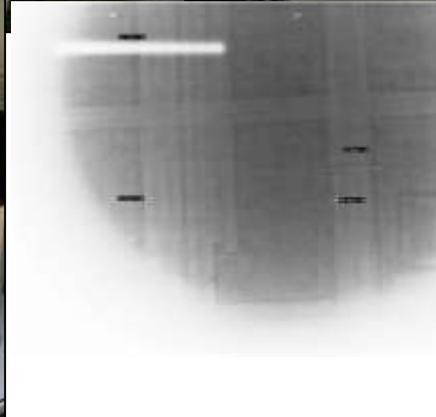
- ・電子線エネルギー及びX線エネルギーが1 MeV未満
  - ・放射線障害防止法：X線源として取扱い、管理区域外使用は可能で、安全管理は電離放射線障害防止規則に準ずる
- 特に 放射線管理区域は1.3 mSv/3monthsの空間線量限度で設定

## 3.95 MeV X線発生装置

- ・電子線及びX線のエネルギー1 MeV以上→放射線障害防止法に則った放射線発生装置
- ・平成17年放射線障害防止法改定時に橋梁検査に限って管理区域外使用が可
  - 「一時的な使用場所の変更」の届を原子力規制庁に提出することで、一時的に使用場所を変更して橋梁の非破壊検査に供すること可

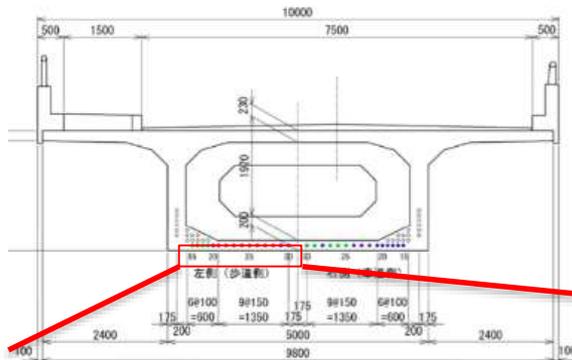
両システムの屋外の使用について上記すべての措置を完了

# 950keVX線源PC橋梁検査(内閣府SIPプログラム)



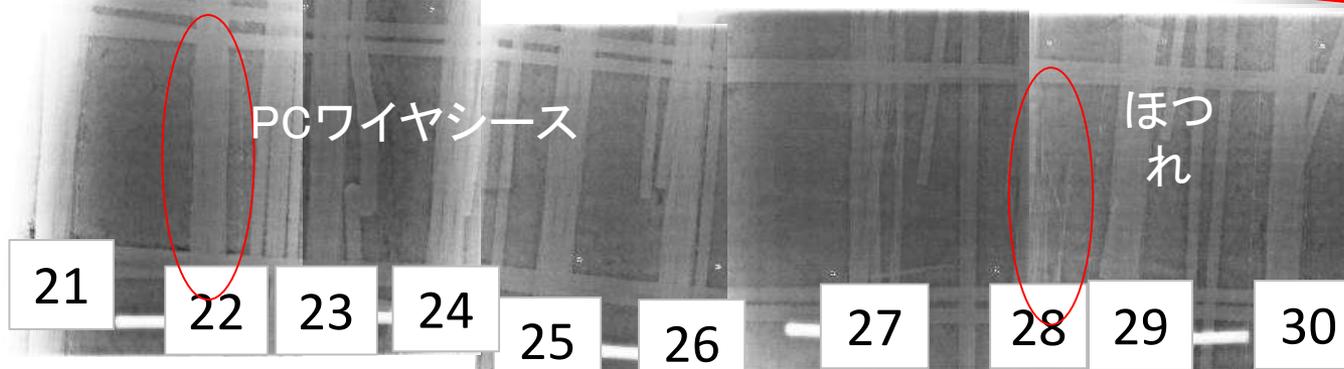
装置の改良による操作性も向上し、適切かつ迅速なセッティング・測定・撤収が可能になった。<sup>15</sup>

# PC橋におけるその場X線透過撮像と3次元構造解析



- ワイヤほつれ、シースの状態などが確認できる
- 道路における線量はバックグラウンドとの明確な差はなかった

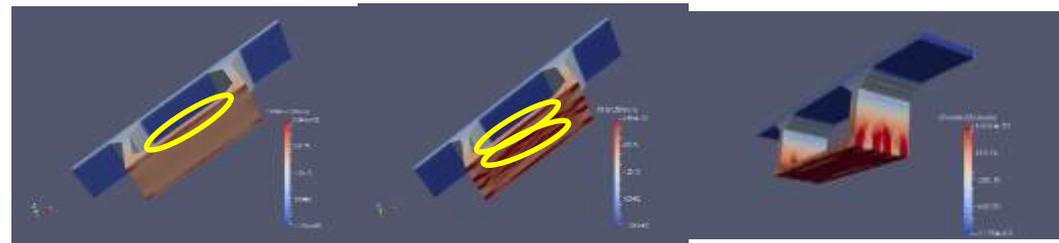
PC鋼材番号	断面減少率
歩道側28番	100%
歩道側27番	70%
歩道側26番	10%
歩道側24番	10%
歩道側23番	10%
歩道側21番	50%



P1:弾性体接合部破壊開始

P2:中央部破壊開始

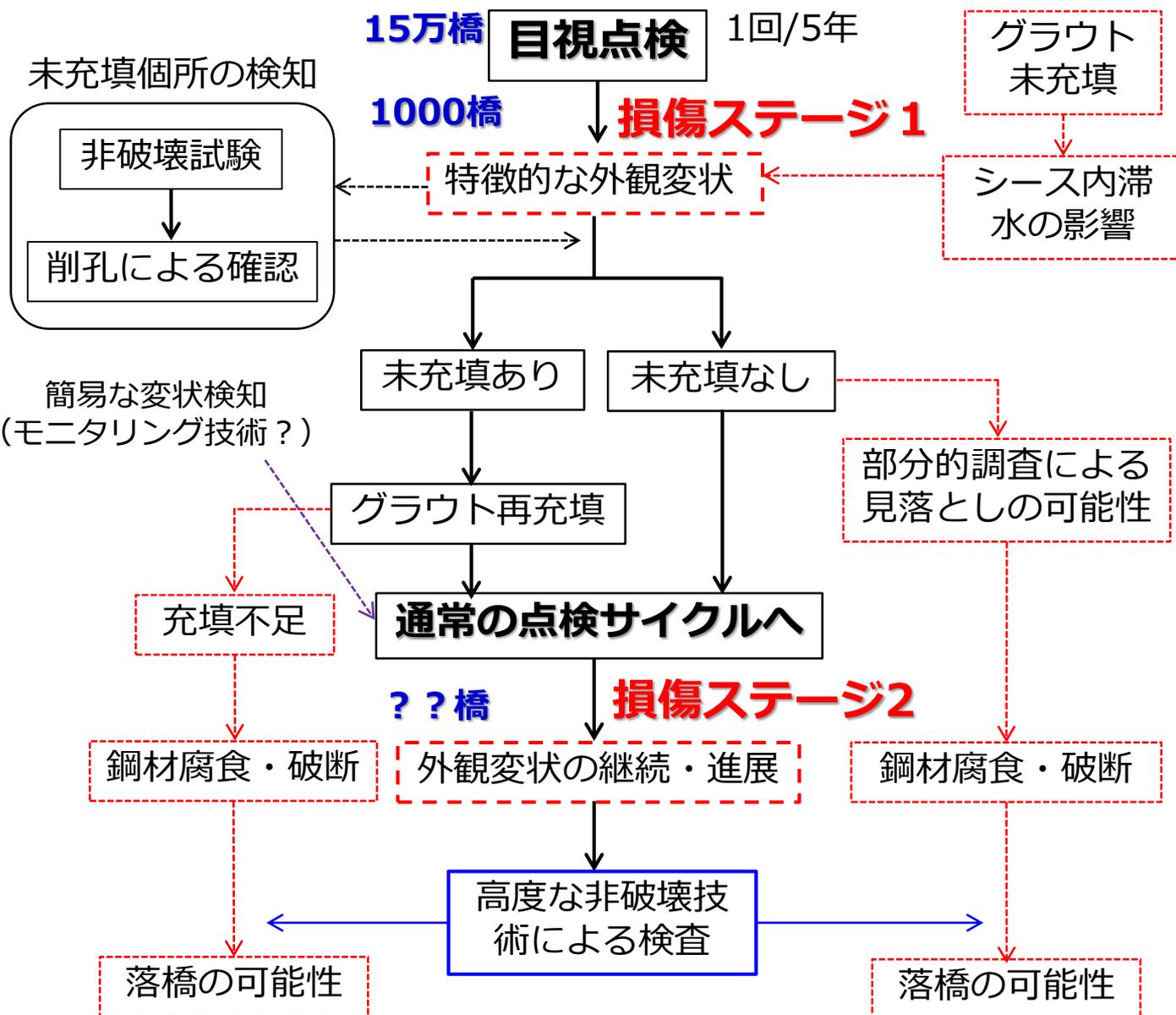
P3:劣化時中央部降伏点



5%の減少

橋梁状態	モーメント(Nmm)	荷重(kN)
健全時	1.90E+11	7.61E+03
劣化時	1.80E+11	7.20E+03

# 定期点検ガイドライン策定【PC損傷】（土木研究所） 17



（シーズに沿ったひび割れ・濾水の跡）

**対象は  
損傷ステージ2  
の部材【現状】**



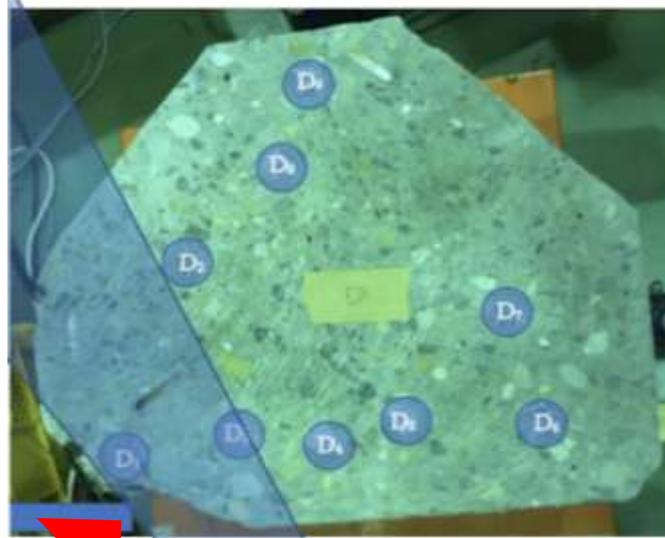
**将来的には  
損傷ステージ1  
の部材へ展開**

# 表面がぼろぼろでも内部は健全のケース



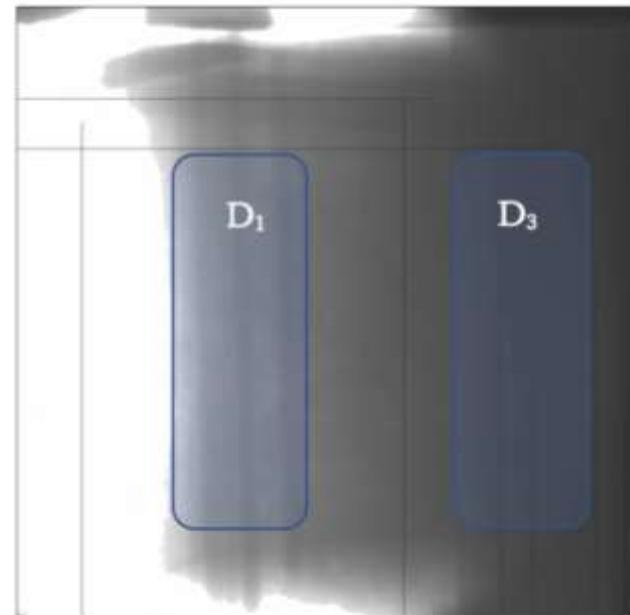
→方向から見た  
表面劣化

型枠鉄筋が露出



断面画像

X線を斜め打ち

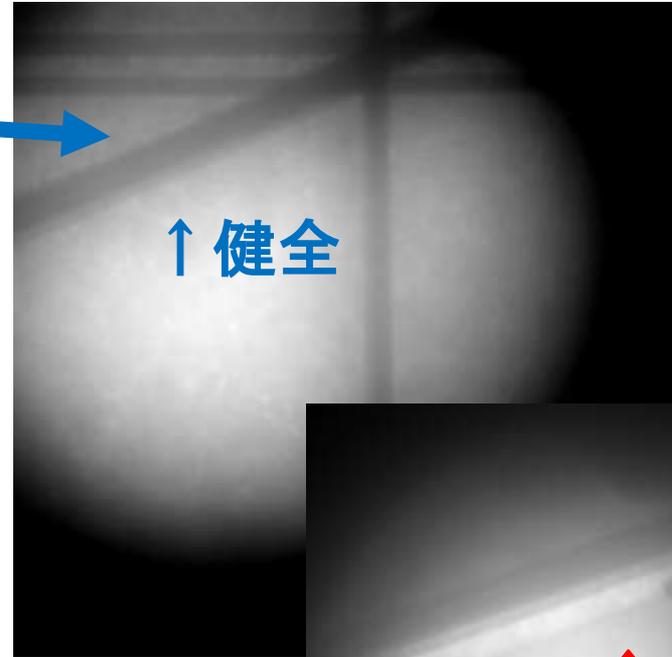


X線透過画像

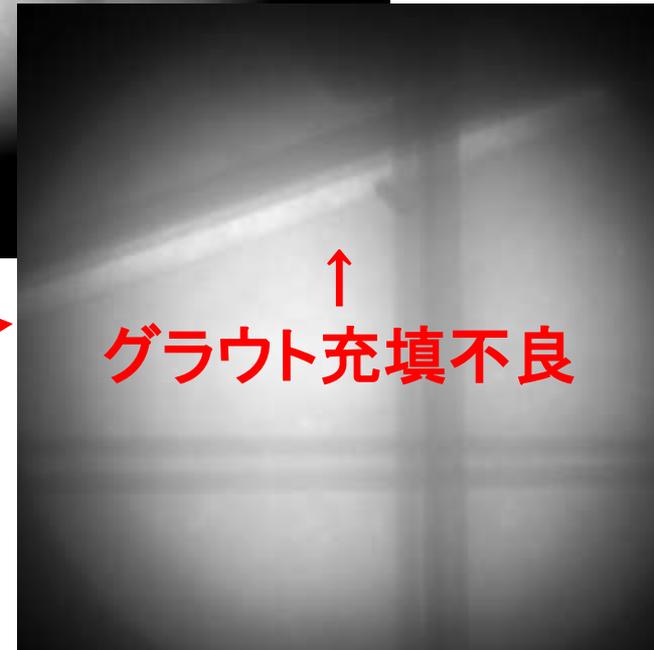
劣化表面に最も近いPC鋼材・D1に  
減肉は見られない

# PC(Pre-stressed Concrete)橋シースへのグラウト未充填

ひび割れ ↓



撮像結果



↑  
ひび割れ・カルシウム成分漏出

# 電源・運搬用車両



電源・運搬用車両（TV中継車の改造）



電源部分と物品運搬用積載部



制御ユニットを積載したまま試験可能→迅速化



現場でのセットアップ

# 雨天との闘い



**5回の橋梁試験のうち  
4回が雨天、3回が豪雨**



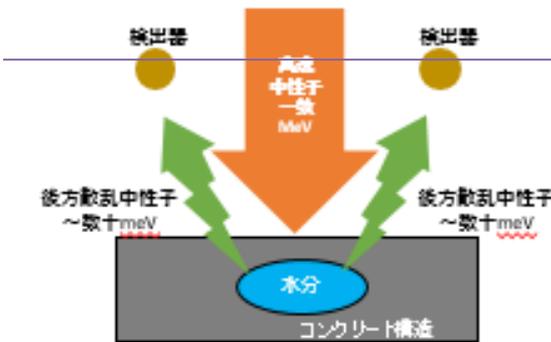
**雨除け、防水筐体、  
コネクタ、高電圧部の  
カバー、改良重ねる**



# 中性子発生用Beターゲットも試作し、設計通りの中性子を発生 劣化橋梁中の水分の検出に成功

放射線障害防止法、電離放射線障害防止規則での線量管理(1.3mSv/3months@管理区域境界)には放射線種の規定はない。法に準じて中性子源としても許位認可を受け、使用場所変更届け出を提出して屋外試験の方向。

## 中性子による水分検出



## 中性子による水分検出の原理

中性子源から数MeV程度のエネルギーをもった**高速中性子**が発生する。

高速中性子は水やコンクリート内に含まれる水素などの軽い元素と**多重弾性散乱**することで**減速**される。

エネルギーの低い**熱中性子**は検出器で検出しやすく、水が存在する場合は中性子の検出数が増加する→**水分の存在**が分かる

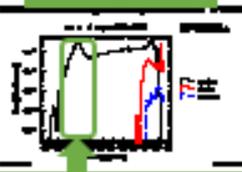
## 入射中性子スペクトル



## 後方散乱中性子スペクトル



## 後方散乱中性子スペクトル

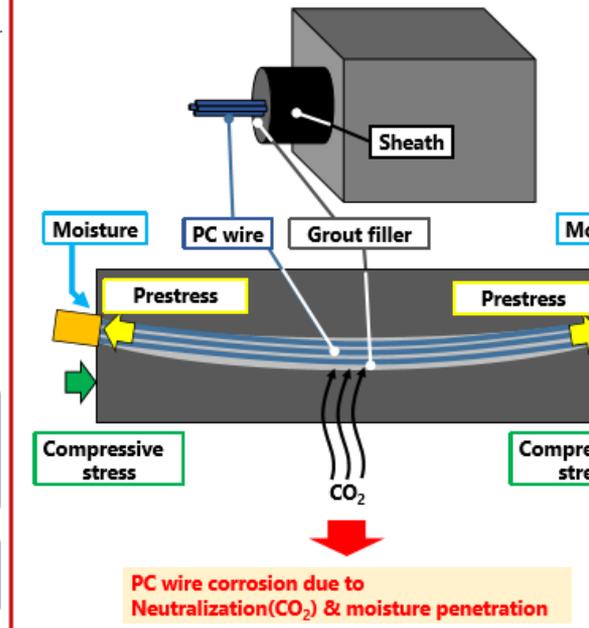


## シミュレーション結果

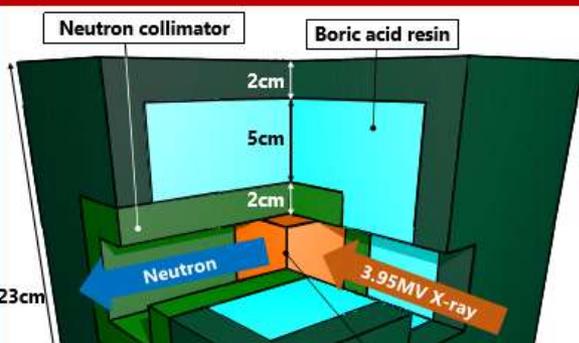
水分が存在するときに低エネルギーの中性子が増加し、**中性子検出数が増加**する (シミュレーション結果)

中空圧板橋の非破壊検査手法として中性子は有望

## Prestressed concrete (PC)



## Neutron source



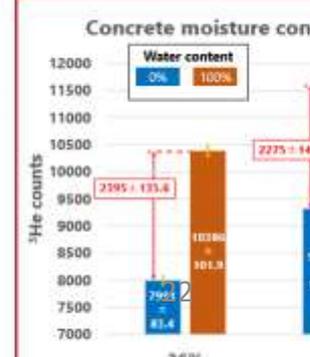
## Detection system setup



## Concrete moisture measurement

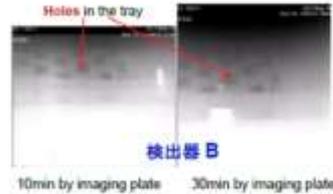
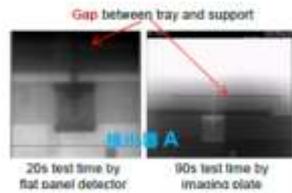
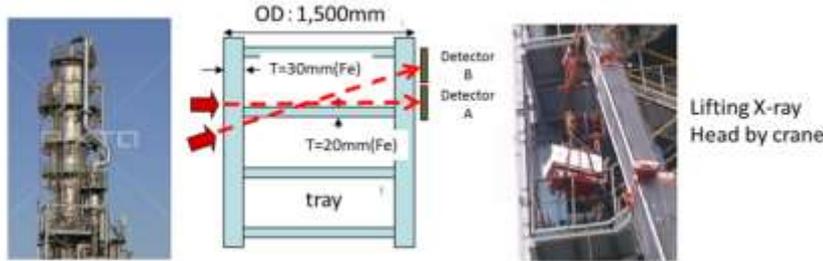


## Experiment result

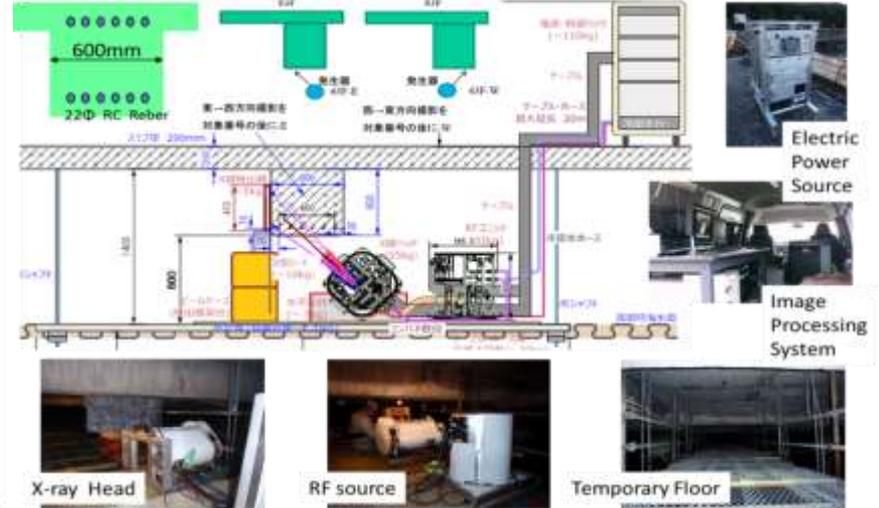


## 波及効果が狙える社会インフラ以外の市場：石油・化学・発電プラント

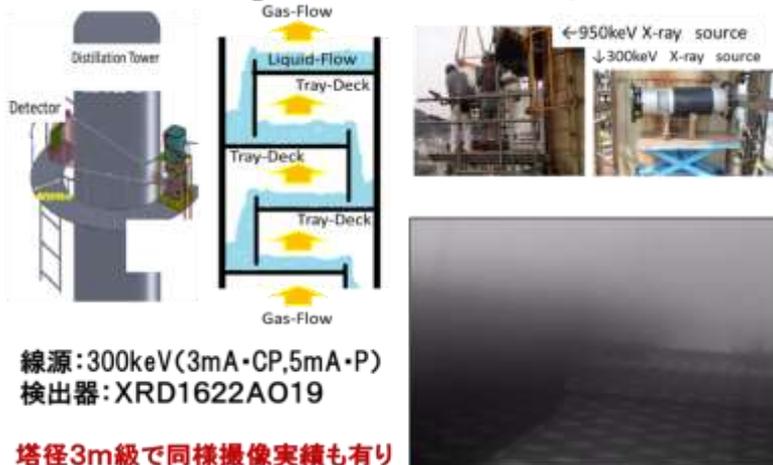
### 蒸留塔Tray-Deck状態撮像



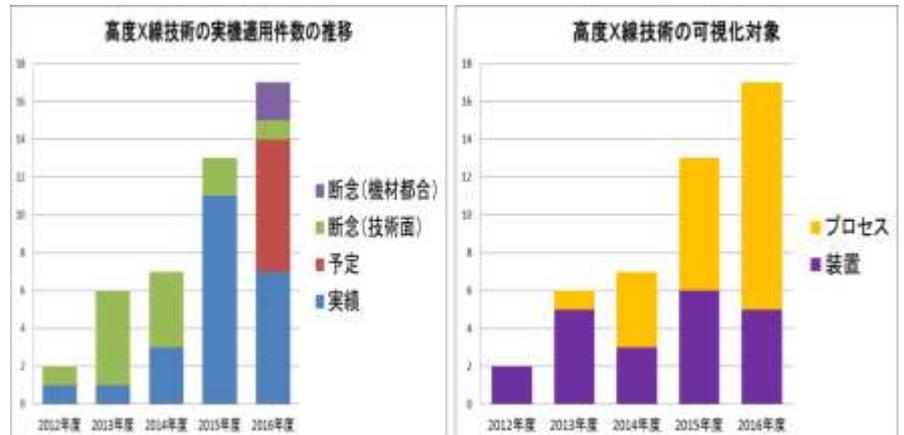
### 鉄筋コンクリート内部鉄筋状態撮像



### 蒸留塔Tray-Deck上の液流可視化



### 化学プラントへの展開(2016年9月現在)



## 可搬型950keV X線源システム

導入費 一式 5,800万円

システム構成：

950keV Xバンド電子リニアック,  
9.3GHz 300kWパルス高周波源  
30kV50Aパルス高電圧電源, リモート制御システム  
空冷型チラーユニット,水冷タングステンターゲット  
W合金ターゲットコリメータ, 内蔵線量計

維持費 600万円 / 2年

高電圧電源IGBT,小型電子銃,  
冷却水系部品, 空冷ファンユニット

※9.3GHz 300kWマグネトロンは  
使用時間による寿命あり。都度、  
有料にて交換

## 可搬型3.95MeV X線源システム

導入費 一式 8,800万円

システム構成：

3.95MeV Xバンド電子リニアック,  
9.3GHz1.5MWパルス高周波源,  
40kV 600Aパルス高電圧電源, リモート制御システム  
空冷型チラーユニット,水冷タングステンターゲット  
W合金ターゲットコリメータ, 内蔵線量計

維持費 700万円 / 2年

高電圧電源IGBT,小型電子銃,  
冷却水系部品, 空冷ファンユニット

※9.3GHz 300kWマグネトロンは  
使用時間による寿命あり。都度、  
有料にて交換

## X線源システム海外展開への課題：

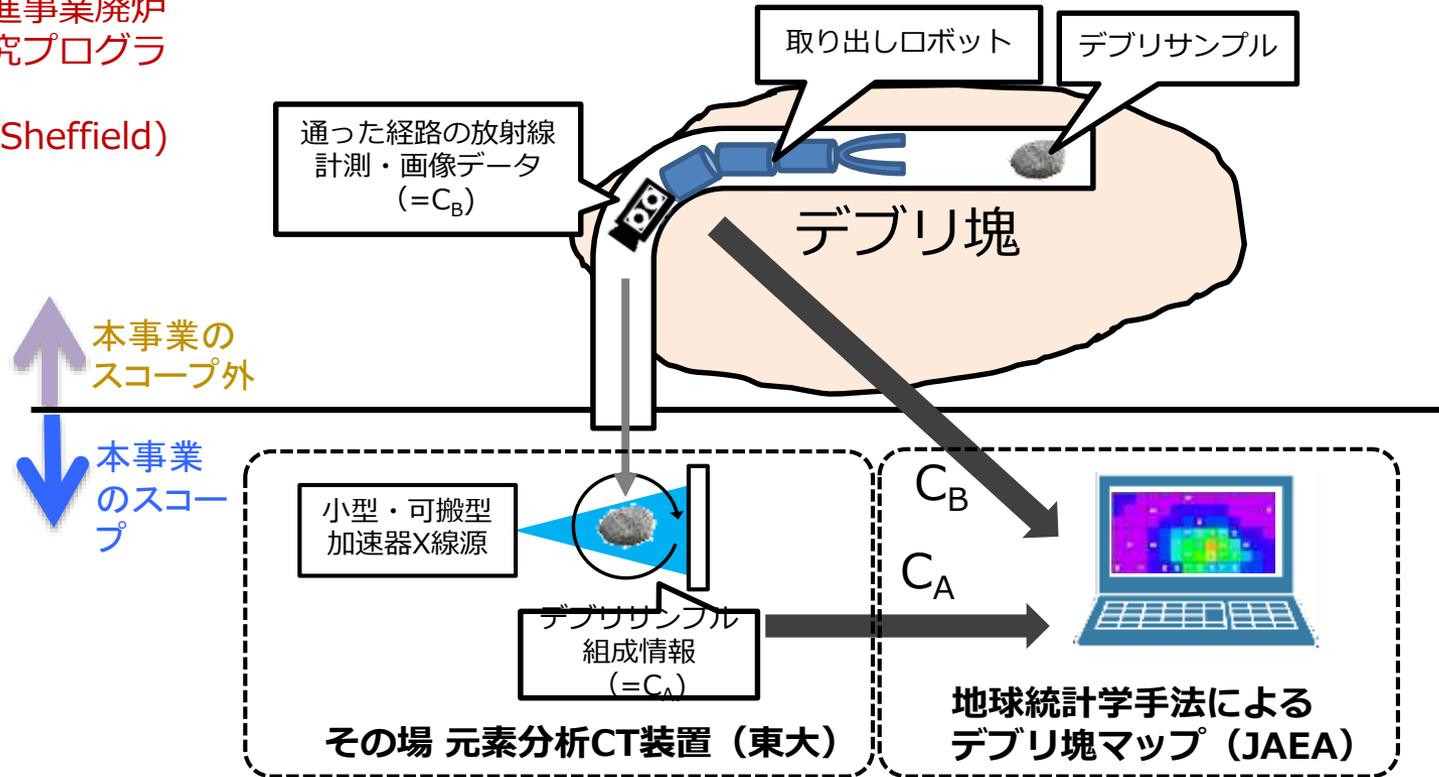
- 日本国内では1MeV未満(電離則対応)と1MeV以上(障害防止法対応)の使用制限条項が大きく異なる。→障害防止法による使用場所規制が厳しい。
- 海外に於いては1MeVを境界条件とするような規制は、現段階の調査では見当たらない
- 設定管理区域境界の線量率および積算線量による制限が主体。
- 電子ビームエネルギーが6MeVを超えるシステムの場合は、加速器ターゲット周辺部材の放射化が想定されるため、海外展開を想定した場合でも6MeV以下のシステムの展開を予定する。
- 展開想定国：米国、東南アジア（フィリピン・バングラデシュ・中国）
- 2018年からの営業展開を想定：米国から、次いで東南アジアへ

# 橋梁検査のまとめ

1. 950keVX線源につき、築別橋切り出し試料、高速道路切り出し試料、大阪府、NEXCO東日本の橋梁および切り出し試料での透視試験のデータを蓄積中である。950keVX線源では40cm厚コンクリートまで1mmの空間分解能で評価可能。
2. 表面コンクリート状態が悪くても内部近傍の鉄筋・ワイアが健全のケース、表面が良くても内部近傍の鉄筋・ワイアがかなり劣化したケースが見つかってきている。  
またPC管中のグラウト未充填箇所も見つかっている。  
現状の、目視・打音のみの検査で大丈夫なのか？
3. 3.95MeVX線源での、初の実橋梁検査を、10月27, 28日に茨城県東海村神楽沢橋で実施。80cm厚コンクリートまで1mmの空間分解能で評価可能。
4. 3.95MeV中性子源の橋梁検査を来年より実施。
5. 橋梁の“医療保険的な”新制度を検討中。

# 本事業の構想

平成29-31年度文科  
省「英知を結集した  
原子力科学技術・人  
材育成推進事業廃炉  
加速化研究プログラ  
ム(東大  
/JAEA/U.Sheffield)  
」



**デブリ塊の物理・化学指標\*分布がその場で得られる！**

\*放射能、微細構造、化学組成、U・Pu含有率、燃焼度など

**→作業員の被曝低減化、取り出し作業のしやすさ（デブリの硬さ）、計量管理等、これらの情報を間接的に得られる！**

# 実施内容と研究体制

全体責任者：上坂 充（東京大学）

【日本側】

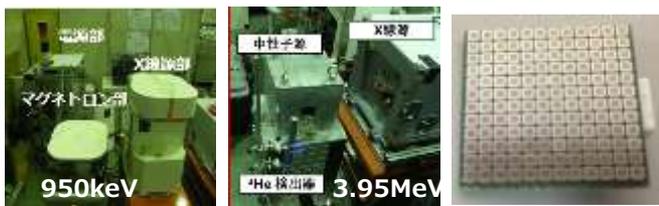
（東京大学）

（原子力機構）

## (1) 燃料デブリのその場元素分析手法開発

### ① その場燃料デブリ元素分析装置の開発

- ・ エネルギー分解型X線検出器の開発
- ・ 元素特有なシグナル（X・ $\gamma$ 線、中性子）の同定



### ② デブリ性状マップ作成手法の構築

- ・ マップ作成手法の検討・取りまとめ・提言

## (2) 燃料デブリ用3次元クリギング手法の開発と応用

### ③ シンクトロン放射X線解析

- ・ 模擬デブリの構造解析

### ④ 燃料デブリ用3次元クリギング手法の開発

- ・ クリギング計算コードの開発
- ・ ソフトデータの選定

### ⑤ デブリ性状を踏まえた計量管理手法の構築

- ・ クリギングの計量管理への適用

【英国側】

全体責任者：Claire L. CORKHILL（シェフィールド大学）

（シェフィールド大学・ブリストル大学・Diamond Light Source）

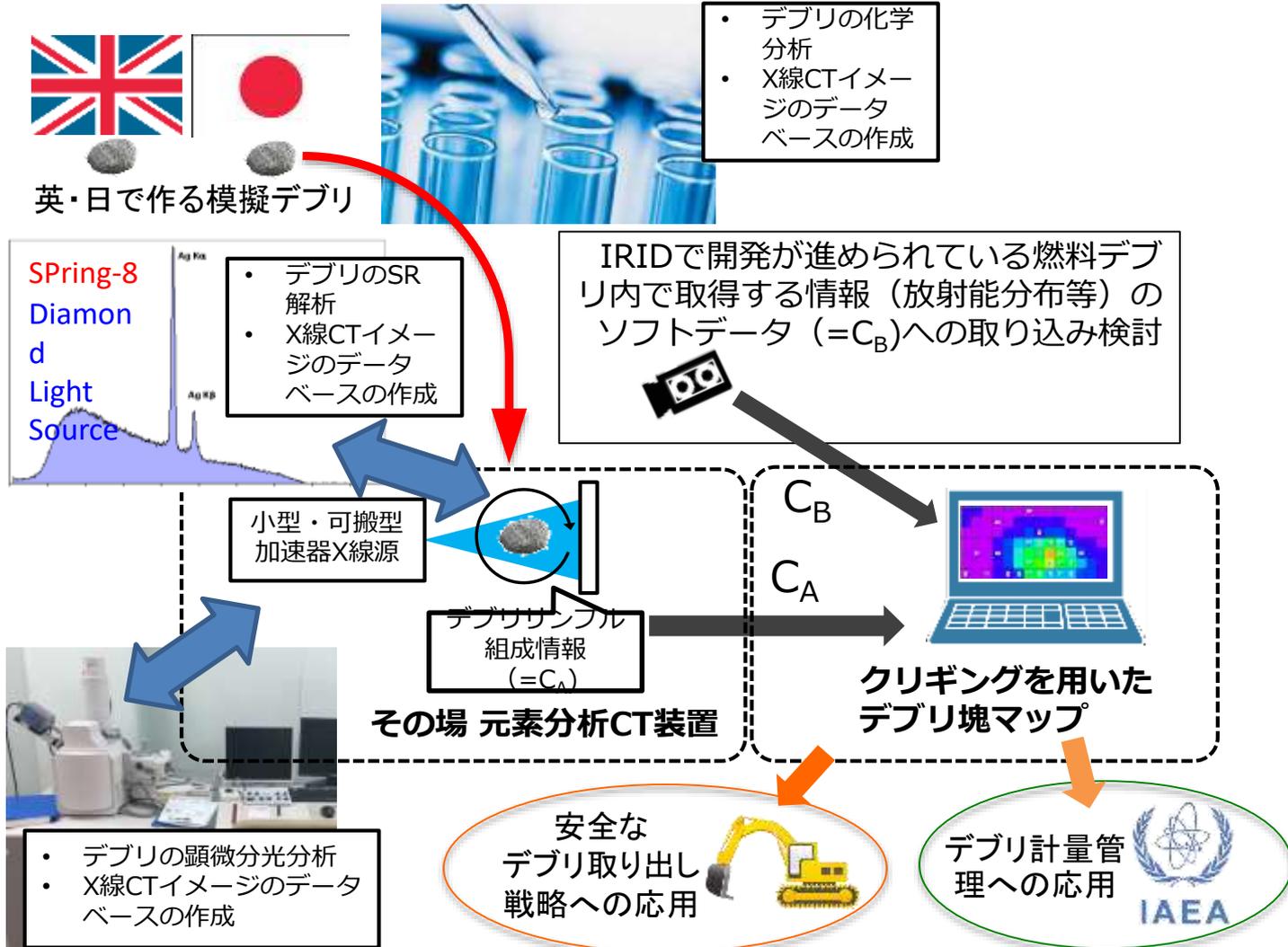
ベンチマーク実験

- (1) 模擬燃料デブリの作成
- (3) 燃料デブリ溶出挙動解析  
フィーデータ解析

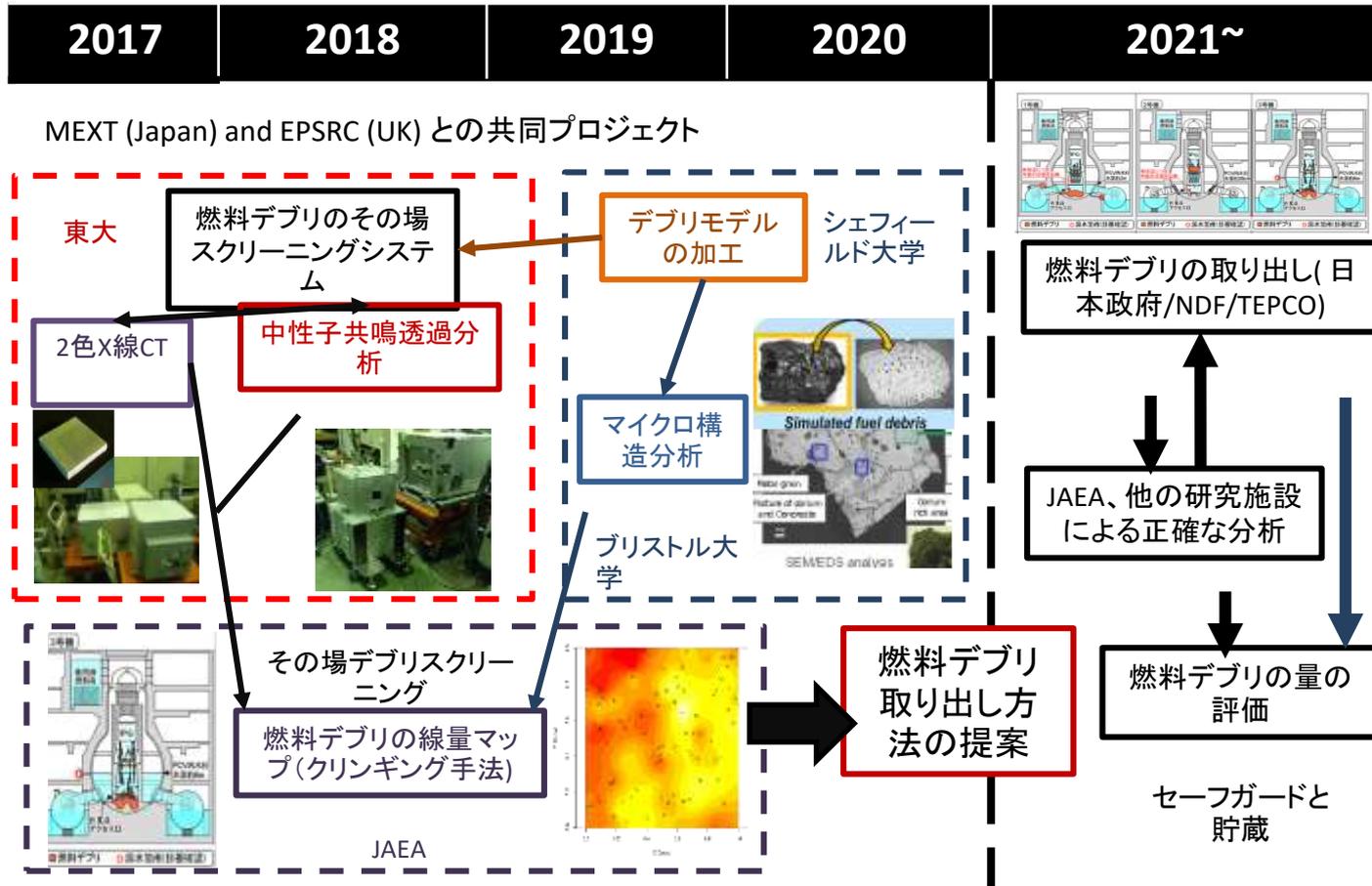
- (2) 燃料デブリ元素分析
- (4) シンクトロン放射X線トモグラ

デブリ性状に係る情報交換

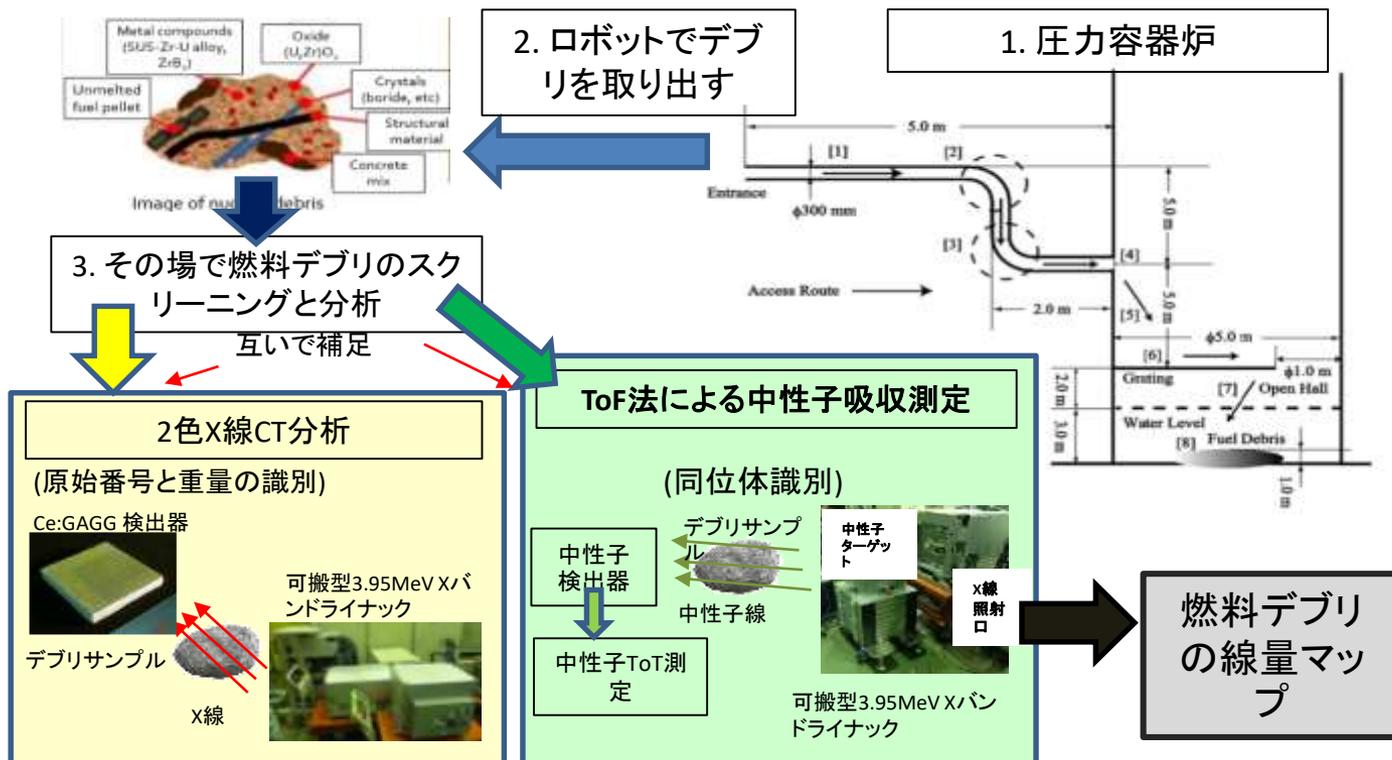
# 本事業のシナリオ



# 燃料デブリ取り出しロードマップ

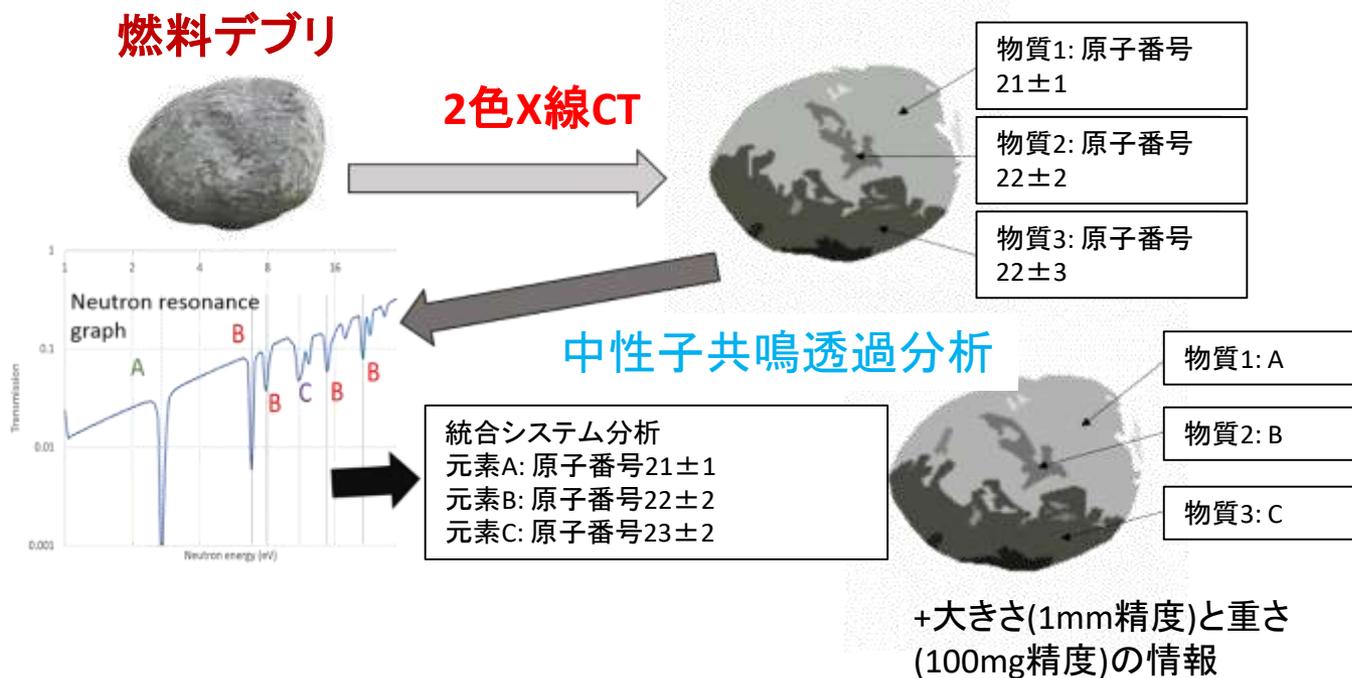


# 福島 1F 燃料デブリその場分析システム



Source: Robotic Society HP  
[http://www.rsj.or.jp/databox/committees/dec/20160907/Decomm\\_koubo\\_jishi.pdf](http://www.rsj.or.jp/databox/committees/dec/20160907/Decomm_koubo_jishi.pdf)

# 燃料デブリのその場スクリーニングフロー



# 講演内容

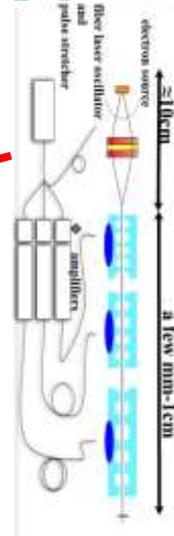
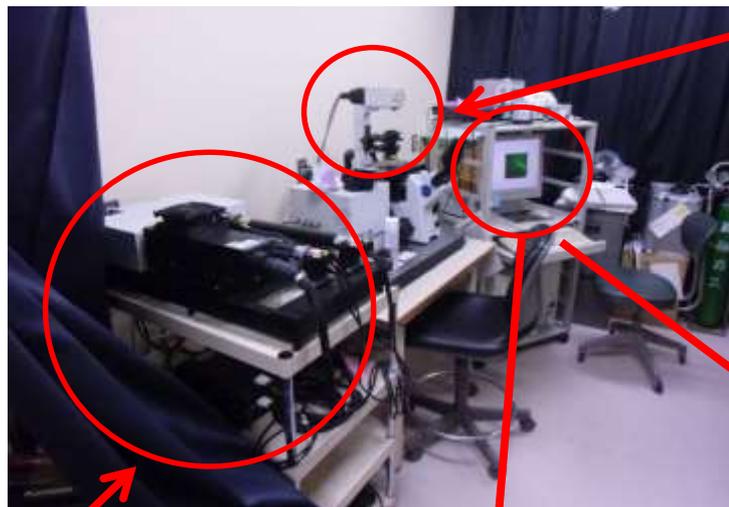
1. はじめに
2. 加速器の小型化
3. 950keV/3.95/6MeV X線/中性子源による  
産業社会インフラ診断・  
福島燃料デブリ分析応用
4. **卓上レーザー加速器の放射線生物学応用**
5. まとめ

# 放射線DNA損傷修復の動画像化

放射線量は  
 $10^4 \sim 5$  Bqで  
 標準線源レベルで  
 一般区域で使用可能

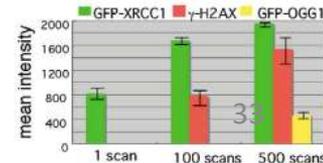
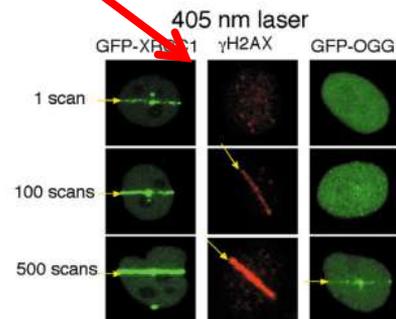
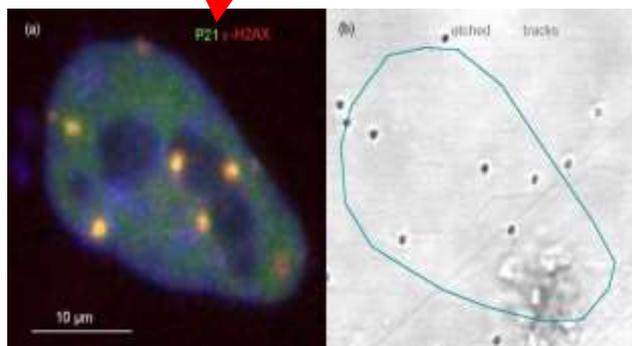
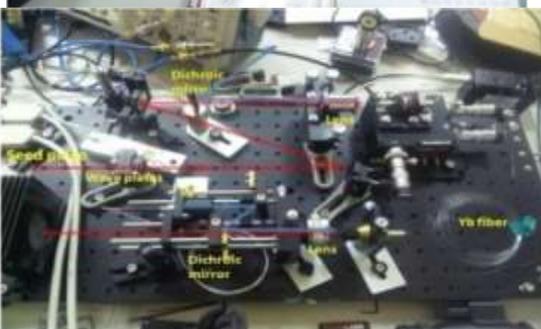
ファイバーレーザー・  
 アンプ

マイクロビームUVレーザーDNA損傷修復  
 オンライン顕微鏡観察システム  
 (東北大学加齢医学研究所安井明教授)



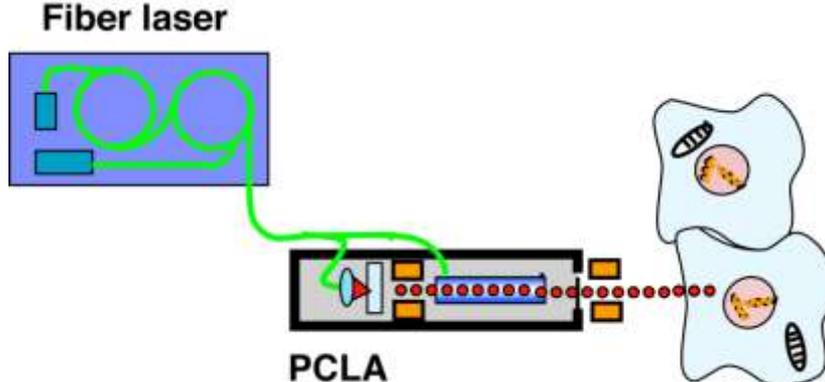
オンチップ  
 電子・X線源

UVレーザー・X線  
 によるDNA損傷・修復の  
 観察と比較検討

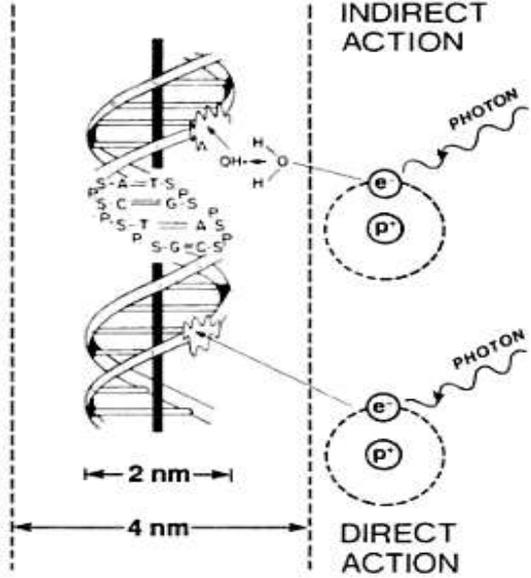
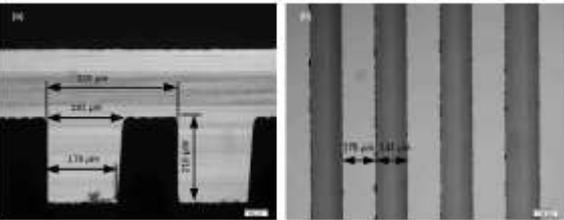


# 半導体製造技術を活用したマイクロ電子線形加速器の開発とナノメートル電子ビームの生成

オンチップ線形加速器を開発して確実に100nmサイズマイクロビームを発生させ、染色体・DNAを狙い打ち



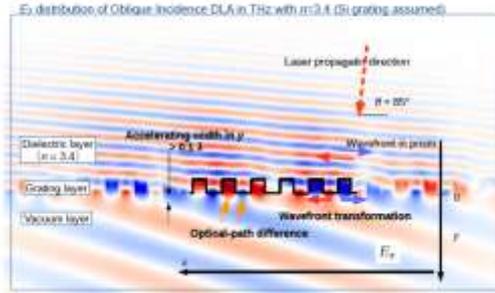
Fabrication of Si Grating for THz OI-DLA



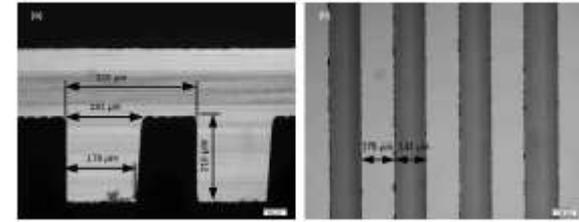
放射線DNA直接・間接効果

がん治療・低線量被ばくでの染色体・DNAの損傷・修復の物理・化学・生物学データの蓄積に貢献

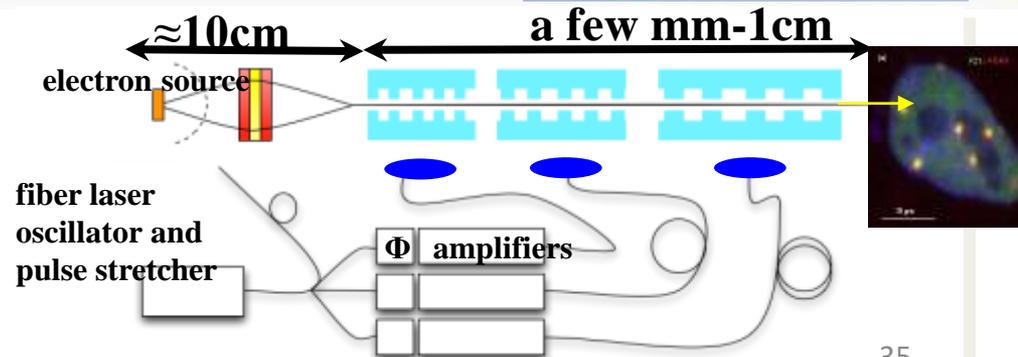
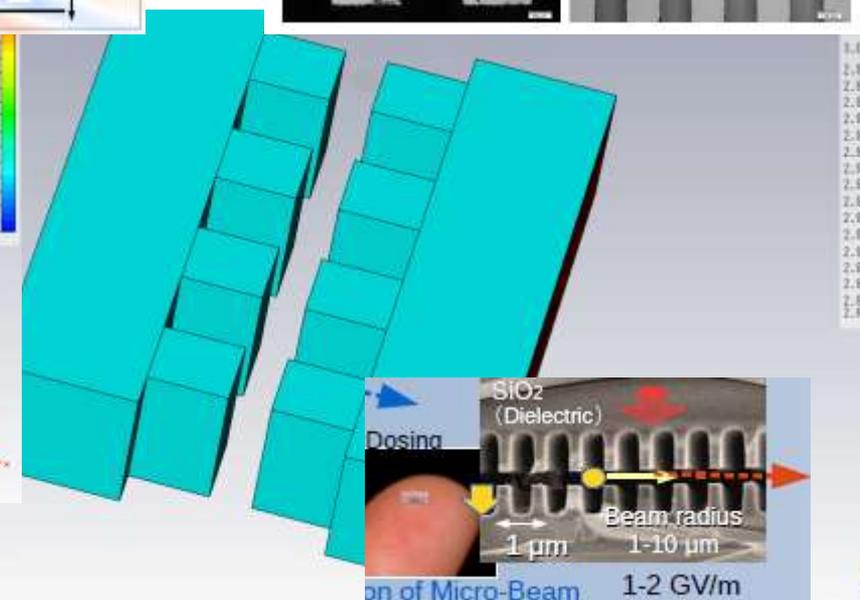
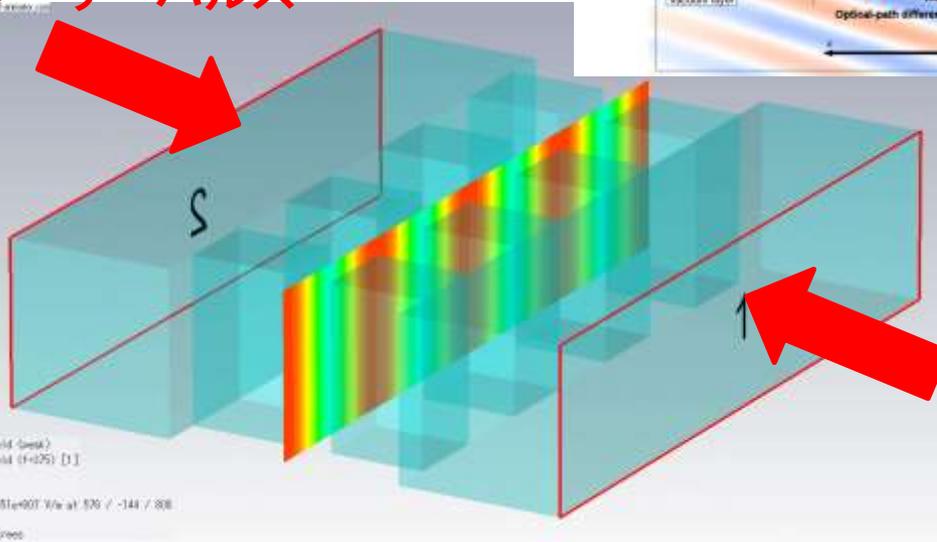
# ナノメートルサイズの電子加速器の数値解析・設計



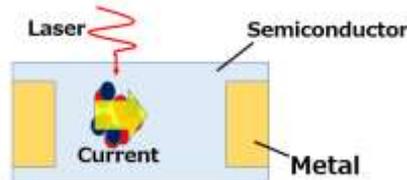
Fabrication of Si Grating for THz OI-DLA



ファイバーレーザーからのレーザーパルス



# 卓上レーザーマイクロイオンビーム源 (DNA損傷修復動画像化)



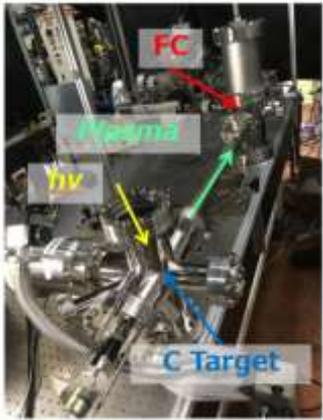
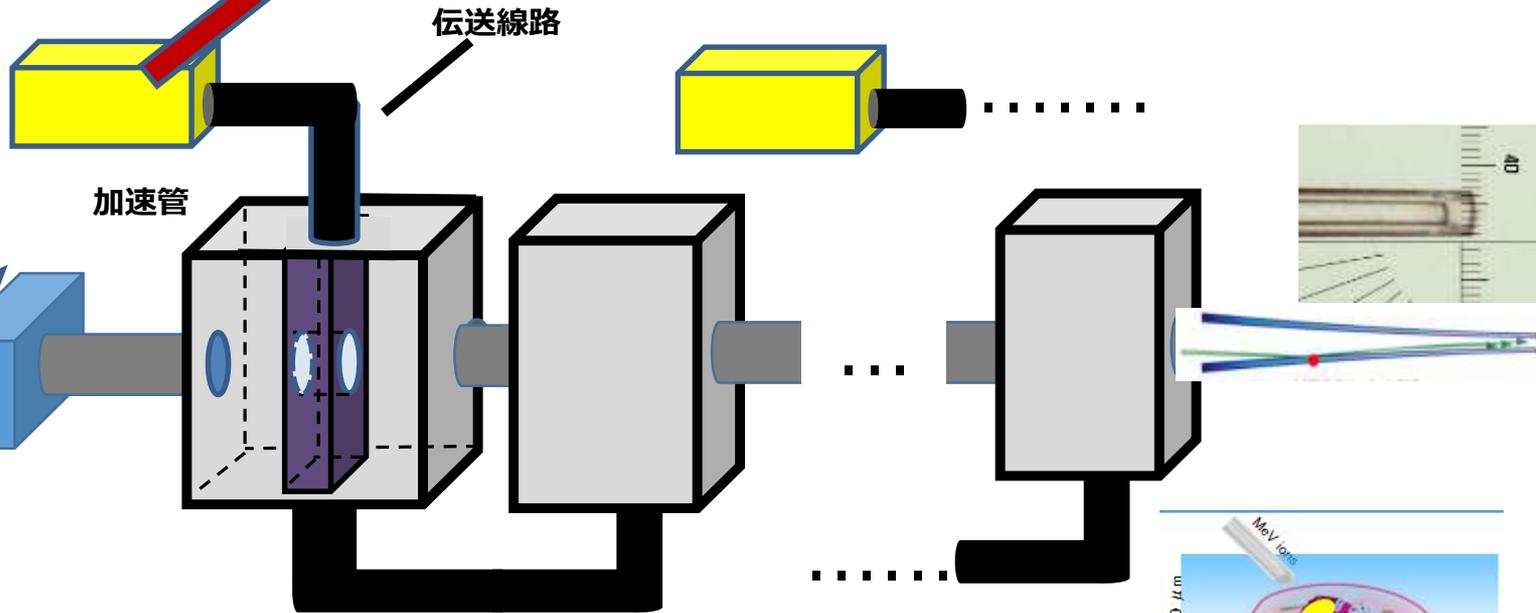
イオン :  $10^{11}$ 個/秒  $\rightarrow$   $10^{-8}$ C

今年春から  
実験開始

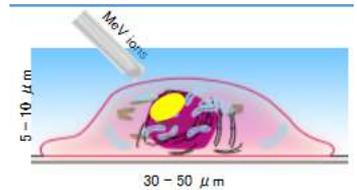
バイポーラ電源(光伝導スイッチ内蔵)

ビーム径 :  
2 mm  
6価イオン :  
 $10^{10}$ 個/秒

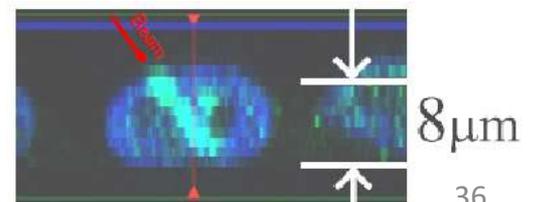
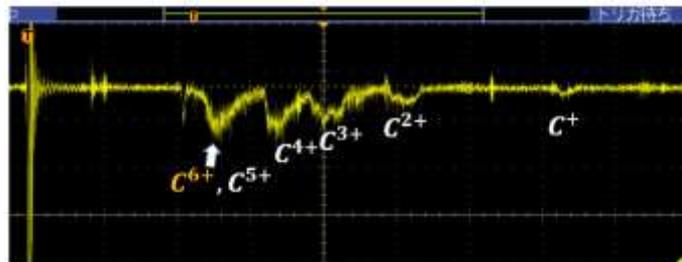
イオン源



加速管での損失:30%  
6価イオン :  $10^4$ 個/秒



ビーム径数 $\mu\text{m}$ のガラス  
キャピラリーに $10^3$ 個/秒  
のイオンを通す

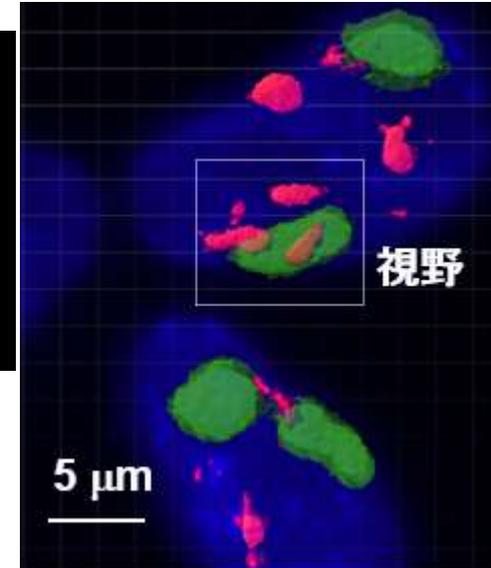
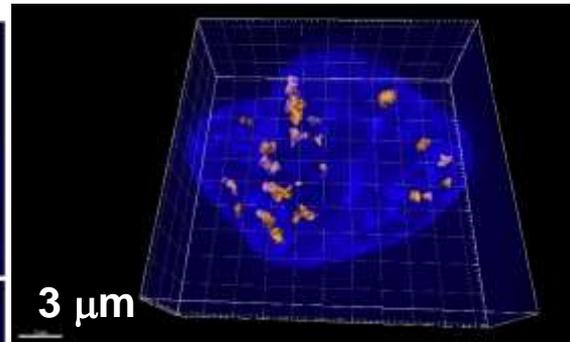
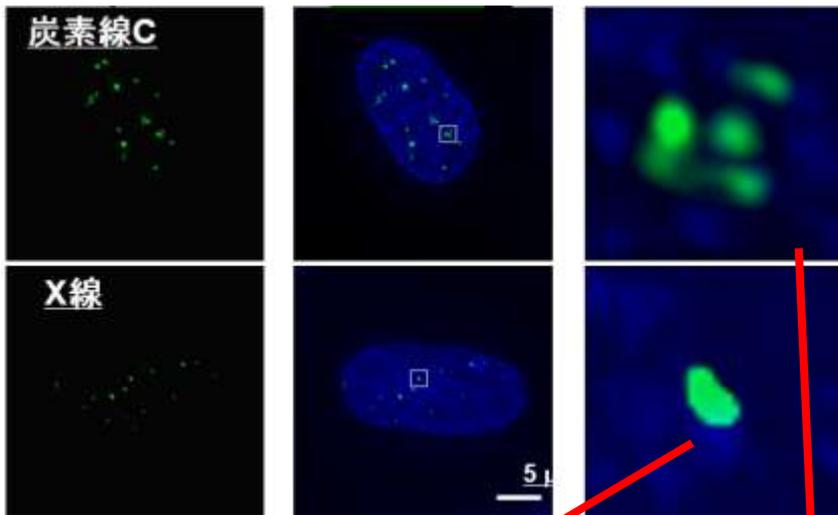


# DNA損傷修復の3次元・動画像化

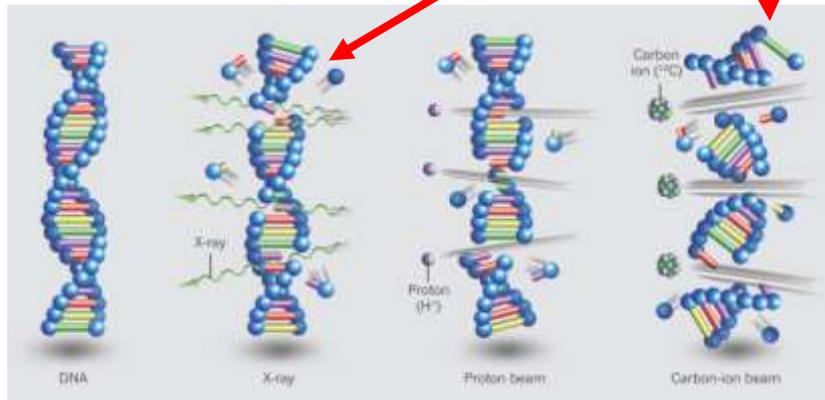
X線・重粒子線による損傷の違い  
生物効果の違いの理由

群馬大学医学部  
柴田淳史先生

高分解顕微鏡によるたんぱく質による  
修復の3次元画像化



赤: DNA損傷  
緑: 染色体



UVレーザーによるDNA修復修復の動画像化

直線  
スキャン



白く見えるのが修復たんぱく質

東北大学  
加齢医学研究所  
安井明先生

# まとめ 1

## 1. 可搬型Xバンドライナック

- ・950keV X線源は産業インフラ検査用に実用中
- ・3.95MeV X線源は社会インフラ検査用に実橋試験開始
- ・加速器中性子源として日本発の屋外使用(平成30年3月)

## 2. 卓上レーザー誘電体加速器

- ・放射線生物学・がん治療用に開発中
- ・放射線によるDNA損傷・修復の3次元動画像化  
がん治療・低線量被ばく・農業育種への応用

## 3. 原子力・放射線技術の、医療に続く、新たな社会貢献に。

# まとめ2

950 keV X線源



3.95 MeV X線/  
中性子源

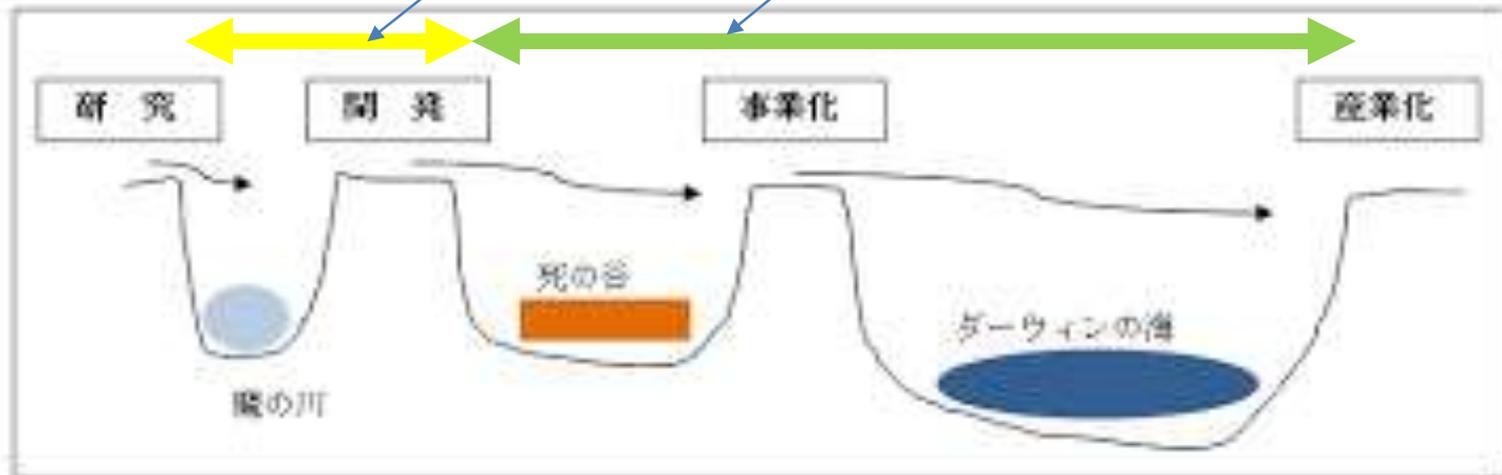


卓上レーザー  
誘電体加速器



国プロ  
支援有

日本で  
支援少



## 謝辞（敬称略）

文部科学省、経済産業省、厚生労働省、国土交通省、内閣府  
茨城県、東海村

東京大学原子力専攻 山下真一、三津谷有貴、  
土橋克弘、橋本英子、学生諸君

原子力国際専攻 高橋浩之

高エネルギー加速器研究機構 吉田光宏、夏井拓也、  
肥後寿泰、松本修二

(株)アキュセラ 草野讓一、山本昌志、田辺英二

産業技術総合研究所 藤原健

(株)日立パワーソリューション 丸山夏代、服部行也

(株)三菱化学 三浦到

土木研究所 石田雅博、大島義信、吉田英二

国土技術政策総合研究所 木村嘉富、小原誠

法政大学 尾川浩一、貝吹太志

(株)関東技研 小野伸二

群馬大学医学部 柴田淳史

東北大学加齢医学研究所 安井明、千葉奈津子