

平成26年8月11日

日本加速器学会第11回年会加速器応用・産業利用セッション

950keV/3.95MeVXバンドライナックX線源の 社会・産業インフラ特定検査への展開

上坂 充^{#, A)}, 藤原 健^{A)}, 土橋 克弘^{A)}, 裴 翠祥^{B)}, 武 文晶^{B)}, 草野 譲一^{C)}, 中村直樹^{C)}, 田辺 英二^{C)}, 菅野 浩一^{D)}, 大矢 清司^{E)}, 服部 行也^{E)}, 三浦 到^{F)}, 本間 英貴^{F)}, 木村 嘉富^{G)}

^{A)} 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻, ^{B)} 原子力国際専攻,

^{C)} アキュセラ(株)., ^{D)} エーイーティージャパン(株),

^{E)} 日立パワーソリューション, ^{F)} 三菱化学(株),

^{G)} 土木研究所, ^{H)} 国土総合政策技術研究所

内容

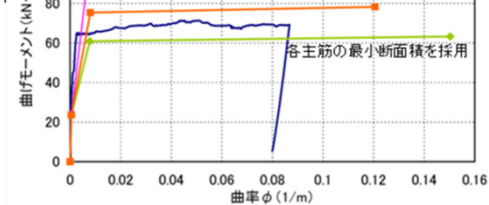
- 950keVシステムの構成改良とその場検査推進
- 950keV/3.95MeVシステムでの内部鉄筋構造形状評価
- 高エネルギーX線用X線カメラ開発状況
- 橋梁特定検査応用への道

現状の課題

コンクリート橋の損傷



➡ 損傷を受けた橋梁の健全性の評価が必要



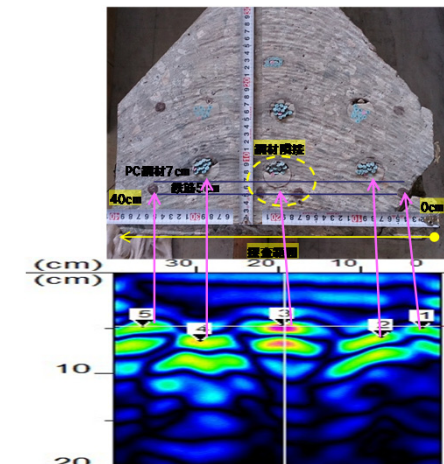
検査技術の現状

内部鋼材腐食状態が不明

● はつり調査



● 電磁波レーダー



残存耐力



内部鋼材腐食状態

ハードとソフトの手法の有機的融合

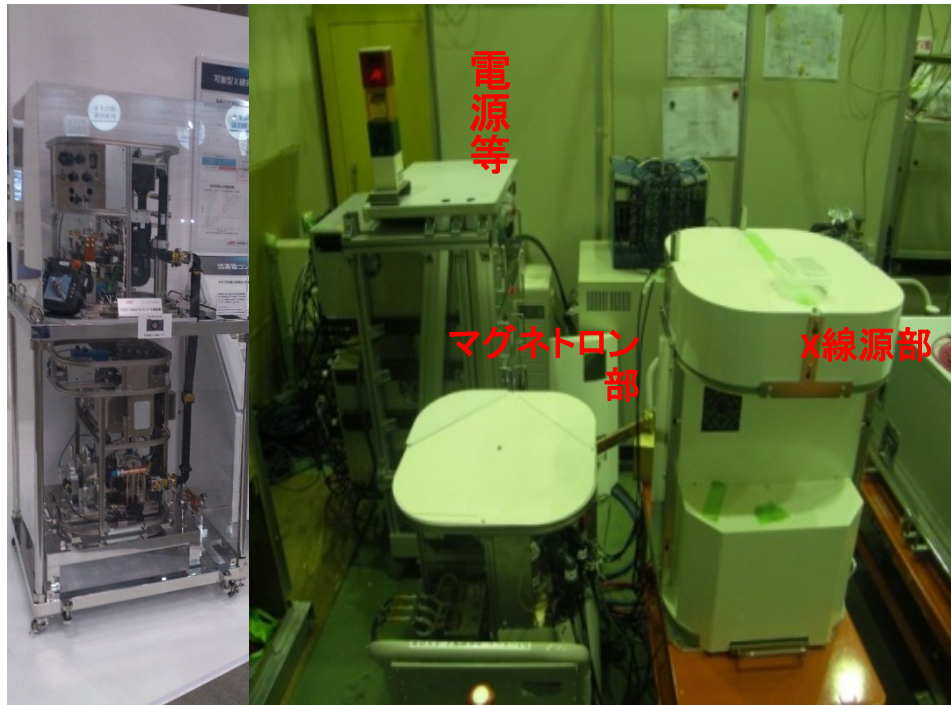
ハード

1. 950keVXバンド(9.3GHz)電子ライナックX線源
現場対応・高操作性型完成
40cmPC橋も数十分で内部鉄筋構造のサイズ評価可能
すでにその場実用検査実績2件、予定多数
2. 3.95MeVXバンド(9.3GHz)電子ライナックX線源
実験室での性能確認・実績有り
40cmPC橋材の透視は数秒で取得可能
CTにより7mm鉄ワイアの形状評価可能
3. 非破壊検査高エネルギーX線専用X線カメラ

ソフト

4. マルチ投影法による鉄筋直径評価
5. 部分角度CT
6. Tomosynthesis
7. Wavelet法による散乱X線ノイズ除去

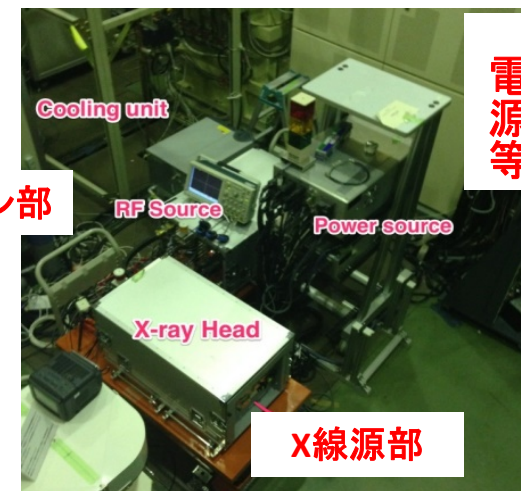
可搬型950keV・3.95MeVXバンドライナックX線源



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 [μs]、330 [PPS]
加速管全長	25 [cm] 以下
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]以上 at 1 [m]
電子銃電圧	20KV
電子銃	三極管

装置仕様	
RF加速空洞共振周波数	9.3 [GHz] ±25 [MHz]
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 パルス幅4[μs] 繰返数200[PPS]
電子銃出力電流	パルスピーク電流 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

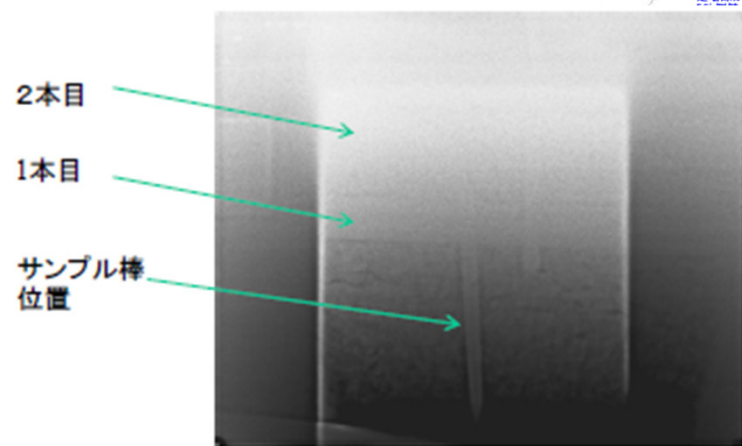
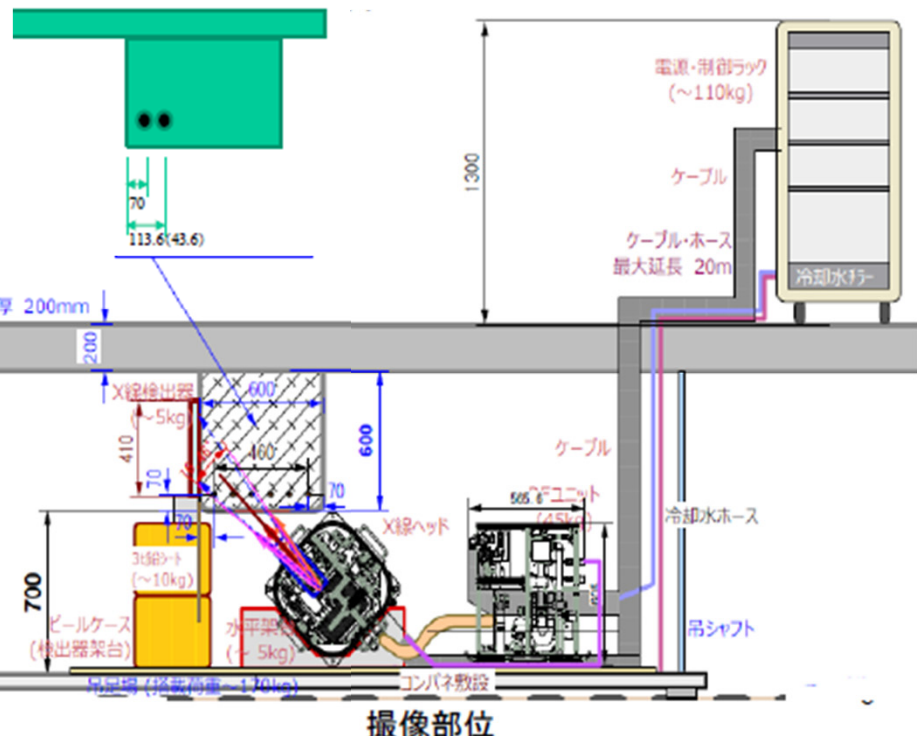
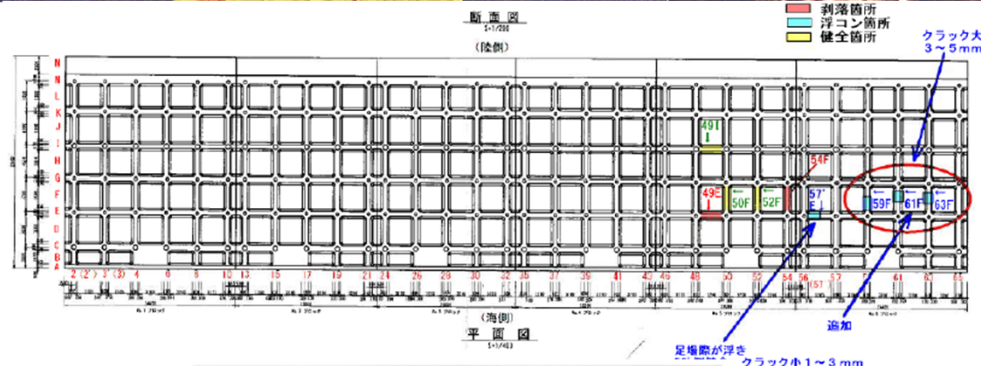
3.95MeV



マグネトロン部

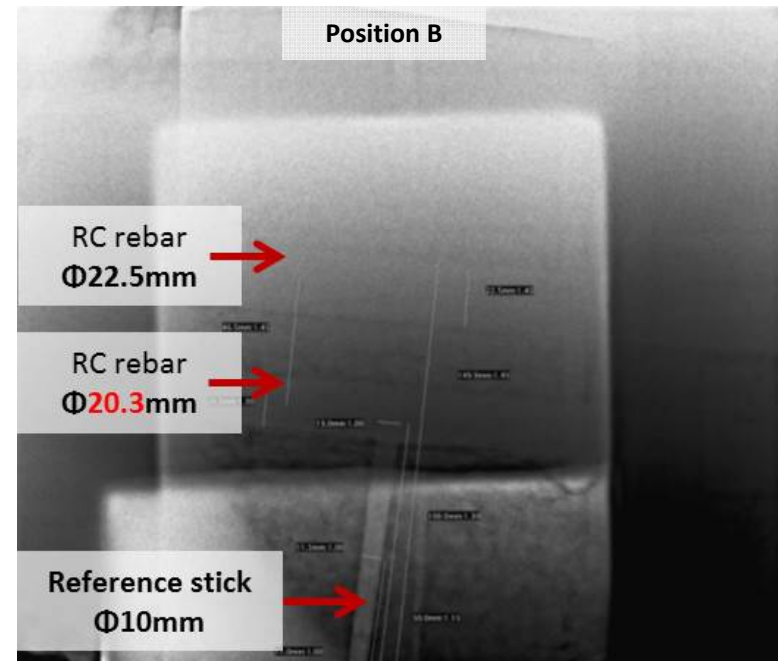
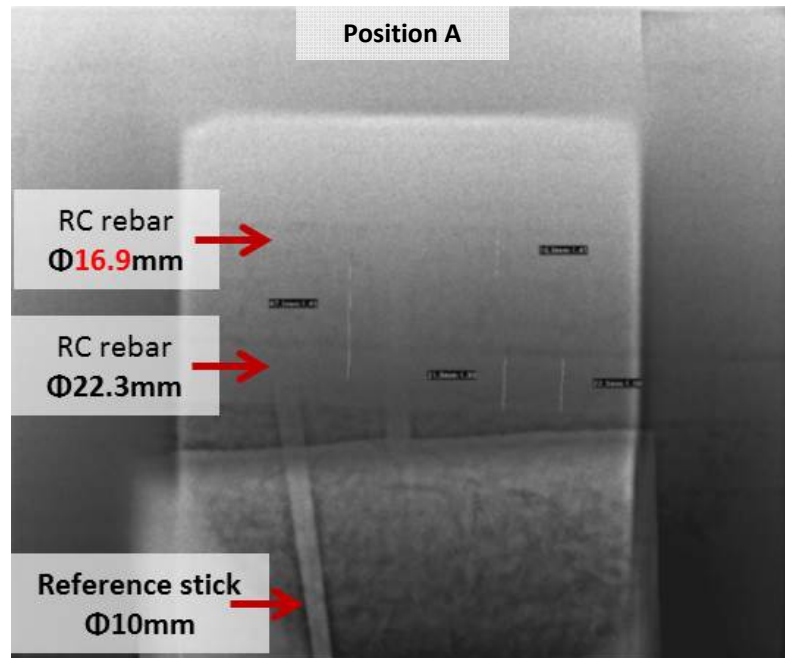
X線源部

On-site Inspection of Reinforced Concrete Pier of Chemical Plants on Jan.8,9,10, 2014



撮像部位

In Situ NDE Experiment of RC Structure



Position	A	B	C
Maximum thinning rate	8.7%	14.5%	7.0%
Maximum reduction(mm)	3.1	6.3	3.9

2014/8/25

Result analysis

- In several position, steel rods **thinning** happened.
- Thinning rate is **7%~14.5%**, still within robust level according to mechanical analysis.
- Maintenance by water proof glue in fixed position is decided instead of overall repair.
- Cost is substantially reduced.

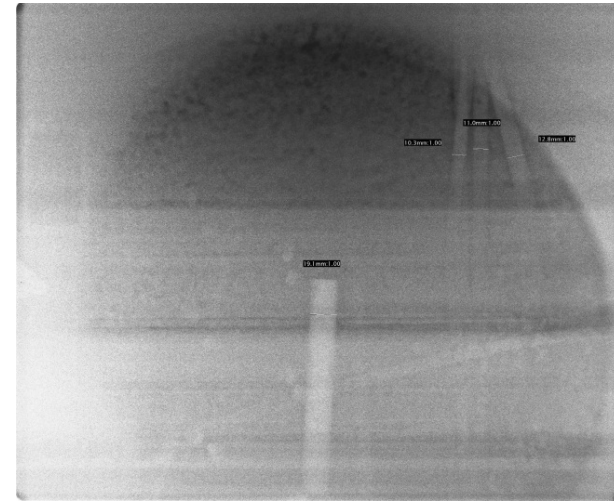
国土総合政策技術研究所における実機劣化橋梁試料ベンチマーク試験(平成25年2月)



Tent



Generator and Linac and bridge



参照試料



Linac on the frame



FPD on the frame

Wavelet解析による境界強調処理



Bridge sample

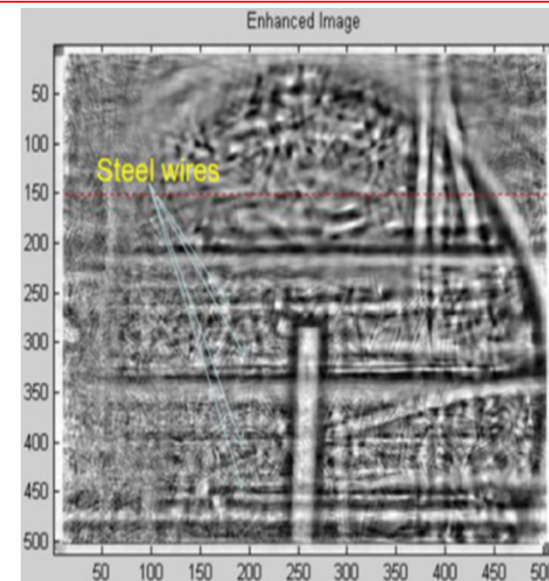
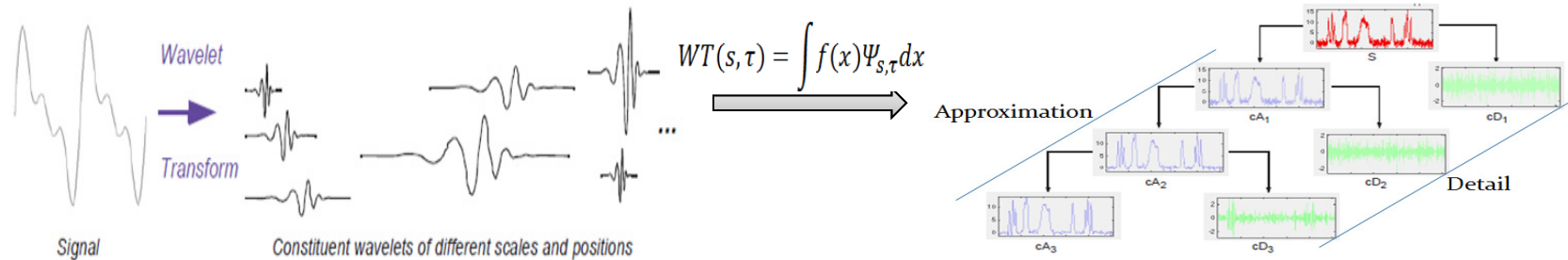


Image Denoising using Curvelet-Wavelet Transform

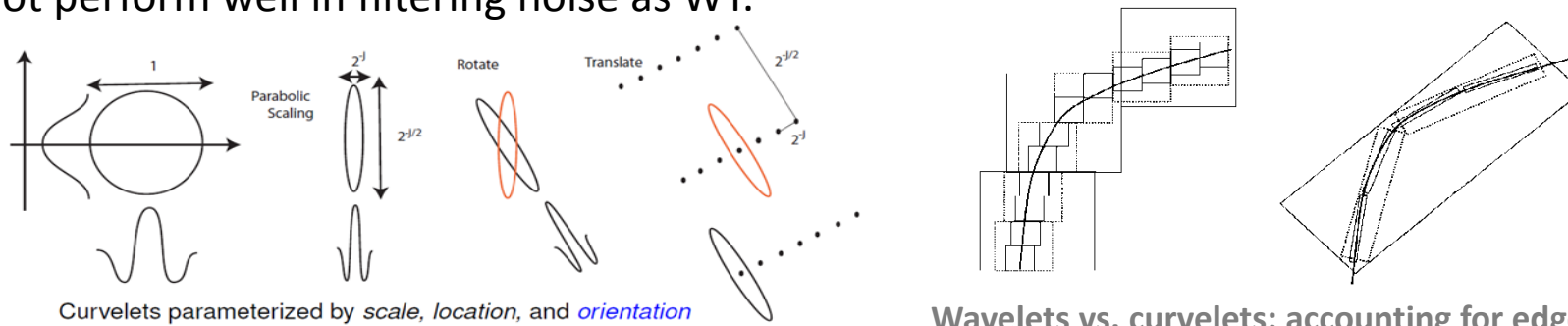
Wavelet transform (WT)

WT can decompose a signal into a several scales that represent different frequency bands using series of wavelets: such property can be used for denoising. However, the wavelets lack of geometrical property in 2D & 3D.



Curvelet transform (CT)

CT is one of the geometric/directional wavelets that splits the whole frequency domain into **multiscales** and **multidirections**=> more accurate for image representation. However, not perform well in filtering noise as WT.

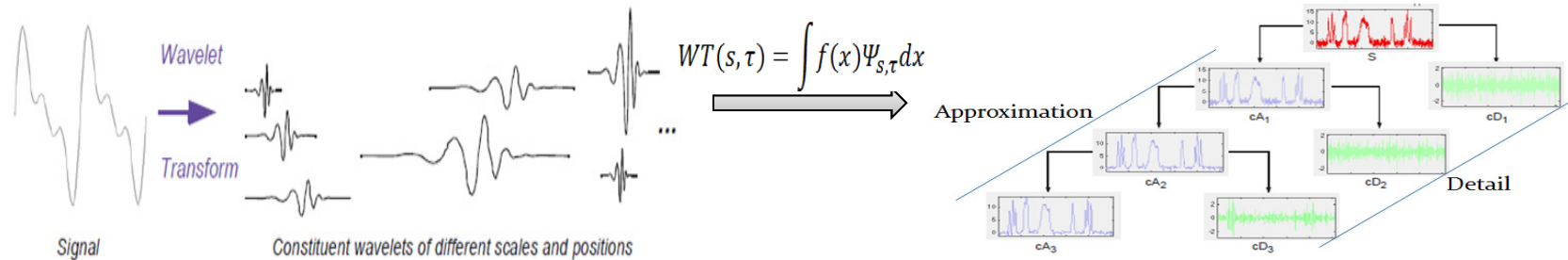


Wavelets vs. curvelets: accounting for edges

Image Denoising using Curvelet-Wavelet Transform

□ Wavelet transform (WT)

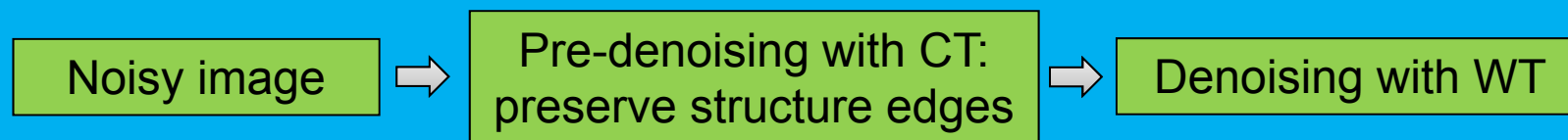
WT can decompose a signal into a several scales that represent different frequency bands using series of wavelets: such property can be used for denoising. However, the wavelets lack of geometrical property in 2D & 3D.



□ Curvelet transform (CT)

CT is one of the geometric/directional wavelets that splits the whole frequency domain into **multiscales** and **multidirections**=> more accurate for image representation. However, not perform well in filtering noise as WT.

□ Combined Curvelet-Wavelet denoising (CWD) :



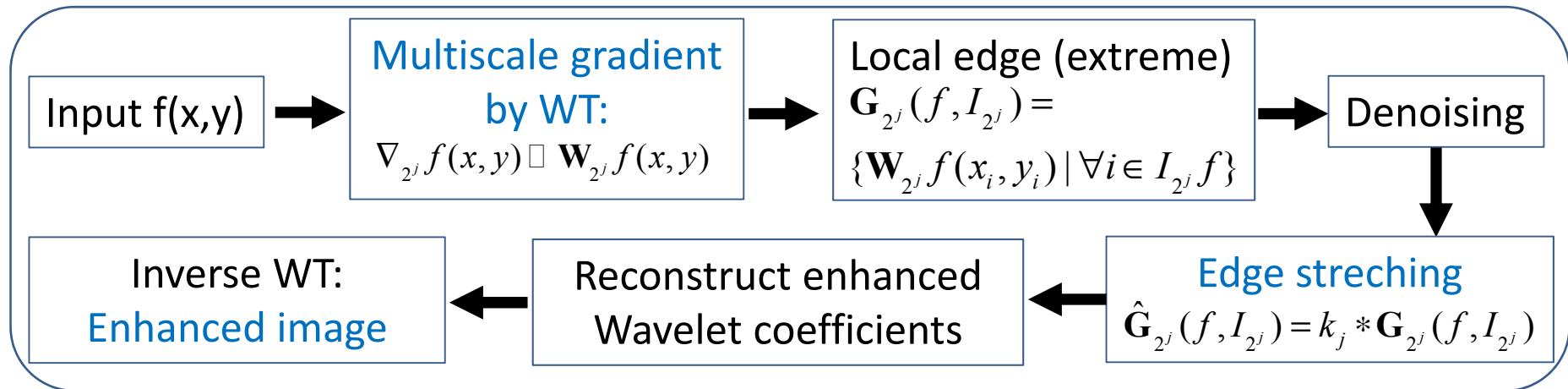
➤ **The combination of CT and WT may provide a better solution than using them individually.**

Image Contrast Enhancement Using Two Methods

- After denoising, the contrast of the image is enhanced with two methods.



- Method 1: Wavelet-based multistiscale edge stretching



- Method 2: Local deviation

$$f_2(x, y) = \frac{f_1(x, y) - M_1}{M_2 - M_1} \times M_g$$

M_1 is the minima and M_2 is the maxima of the input image f_1 among the neighborhood pixels, M_g is the maximum gray level value of the input image.

Results of Image Contrast Enhancement

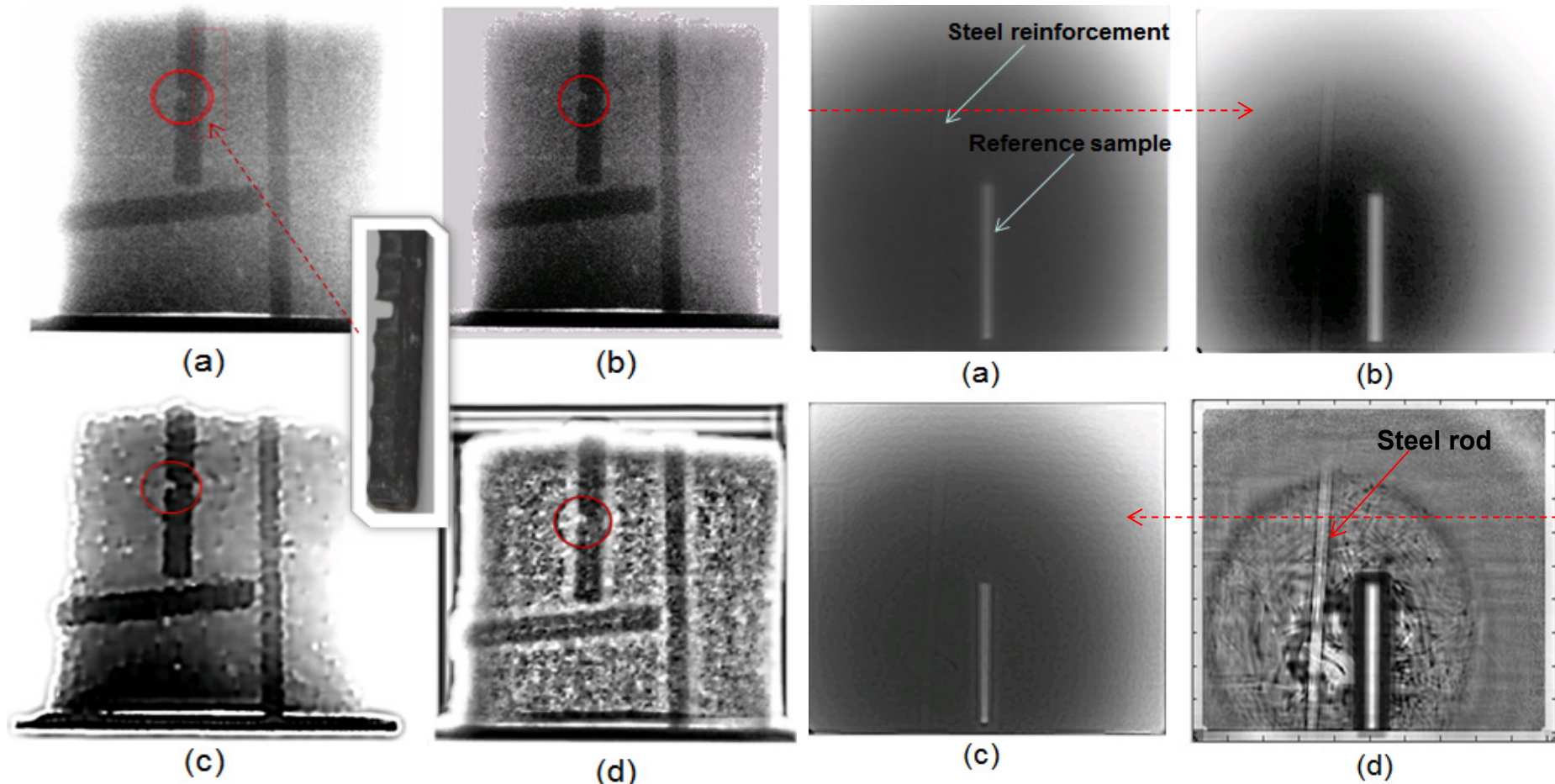


Fig. 8 Results of enhancement x-ray image with various methods: (a) original image, (b) enhanced by histogram equalization, (c) enhanced by wavelet-based edge stretching, (d) enhanced with local deviation

➤ **The method using local deviation can enhance an image with very low contrast.**

Results of Image Contrast Enhancement

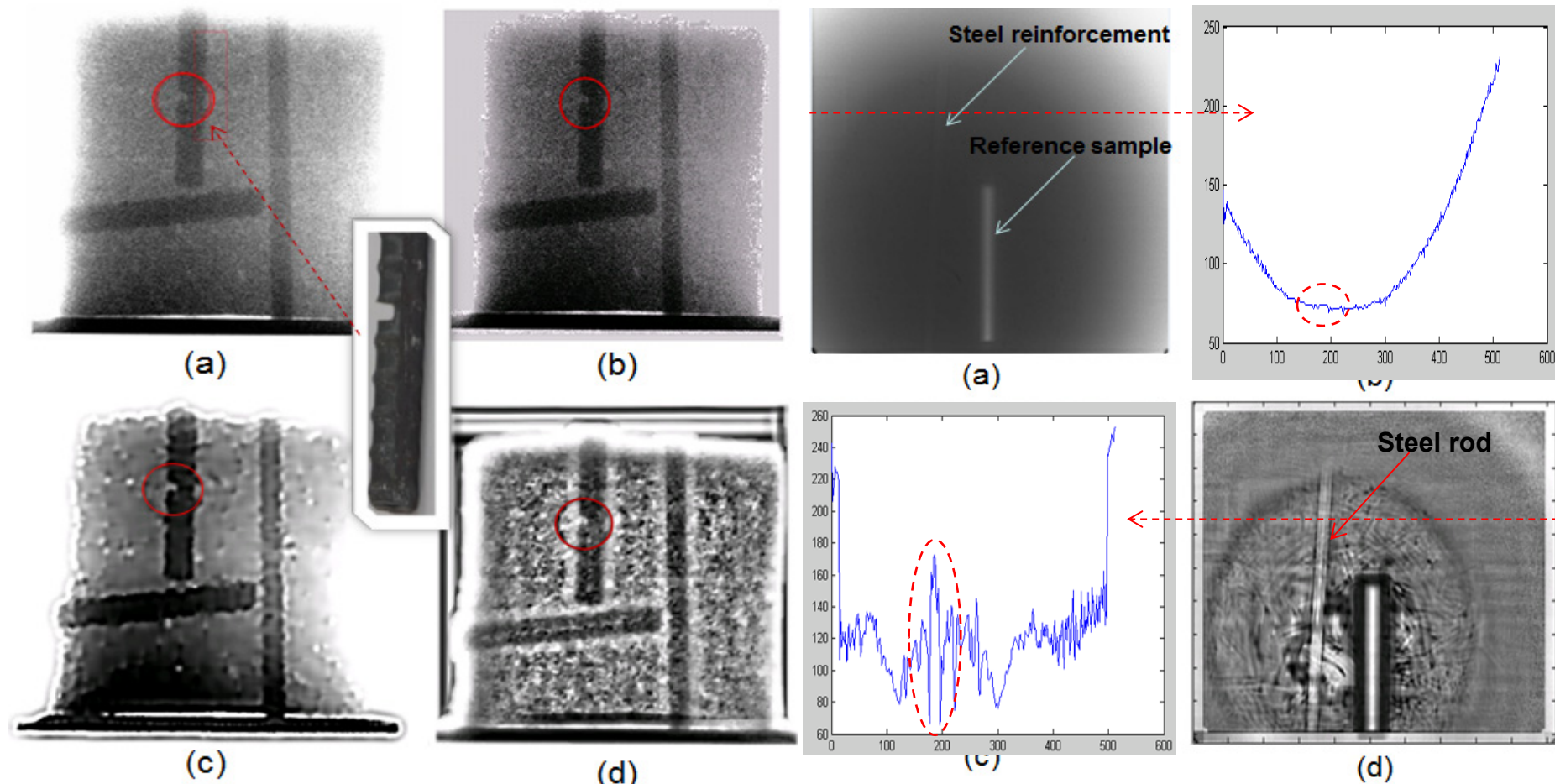
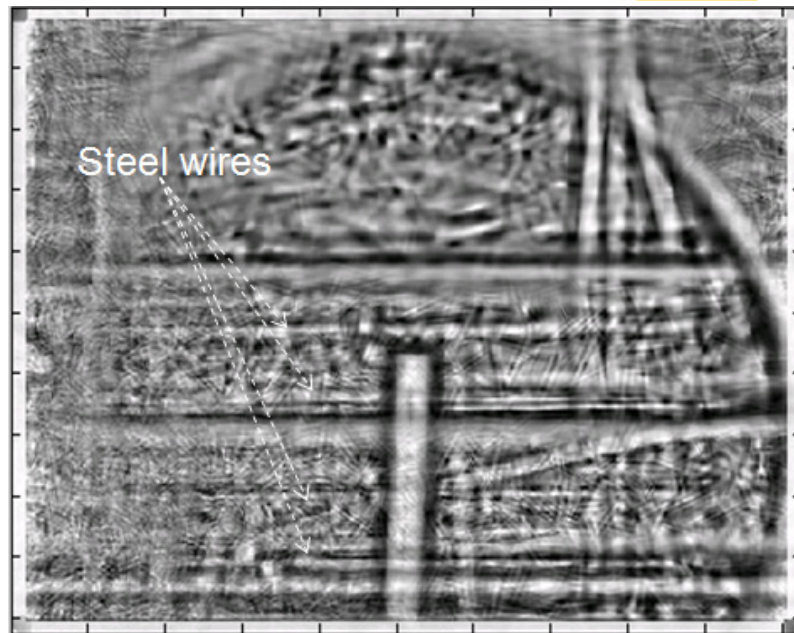
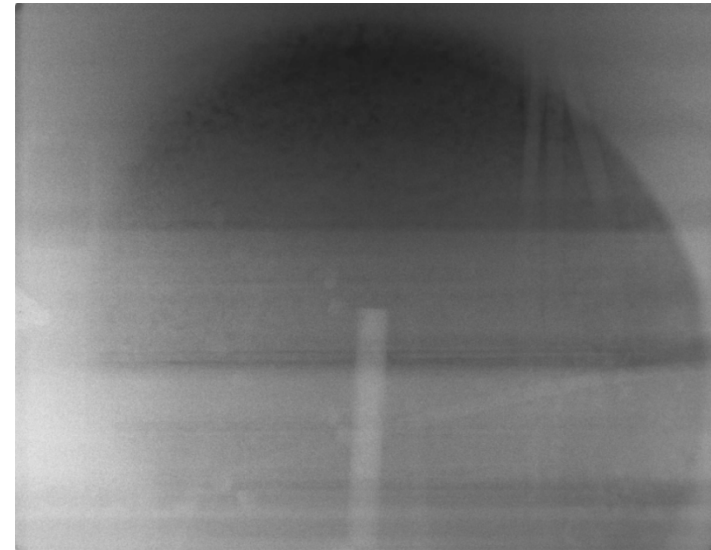
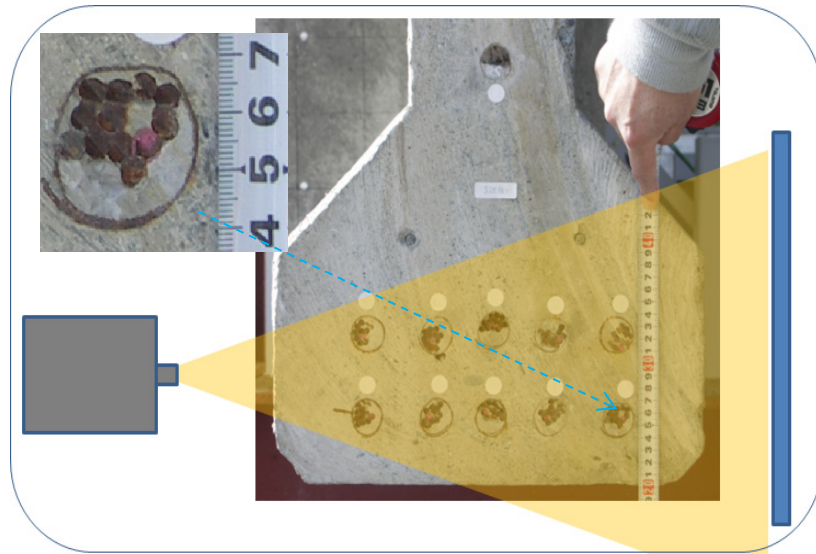


Fig. 8 Results of enhancement x-ray image with various methods: (a) original image, (b) enhanced by histogram equalization, (c) enhanced by wavelet-based edge stretching, (d) enhanced with local deviation

➤ **The method using local deviation can enhance an image with very low contrast.**

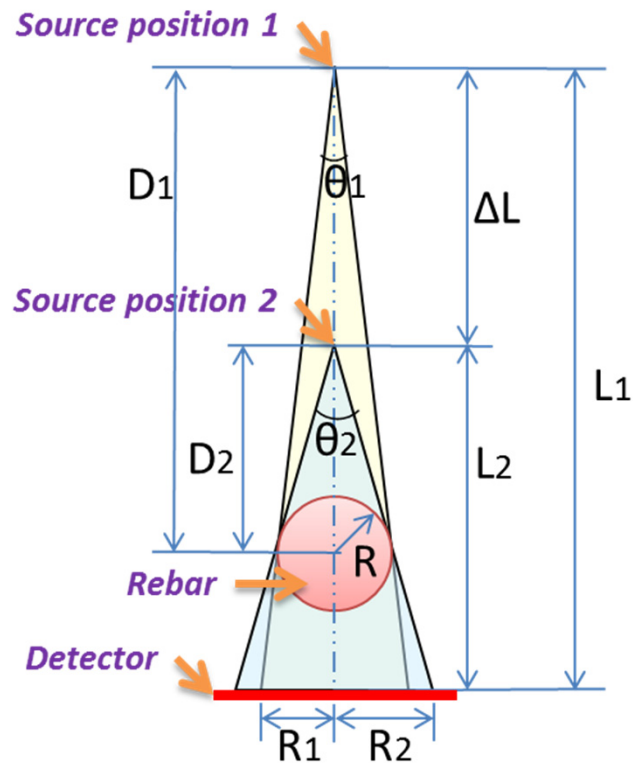
Evaluate Steel Wires in PC with Enhanced Image



- In the enhanced image, several steel wires can be identified;
- Unfortunately, can not to identify their location from the overlapped image => not able to evaluate their size;
- ❑ **Solution:**
- **Partial CT & Tomosynthesis with 3.95 MeV x-ray to reconstruct 3D image.**
- **Pencil beam with collimator => ROI inspection.**

Quantitative Evaluation Method by Radiography

- Lack of necessary prior information
- Take two images at different distance between source and detector
- Analyze the radius in imaging to estimate real radius



The distance between source and detector is D

$$D_1 - D_2 = \Delta L$$

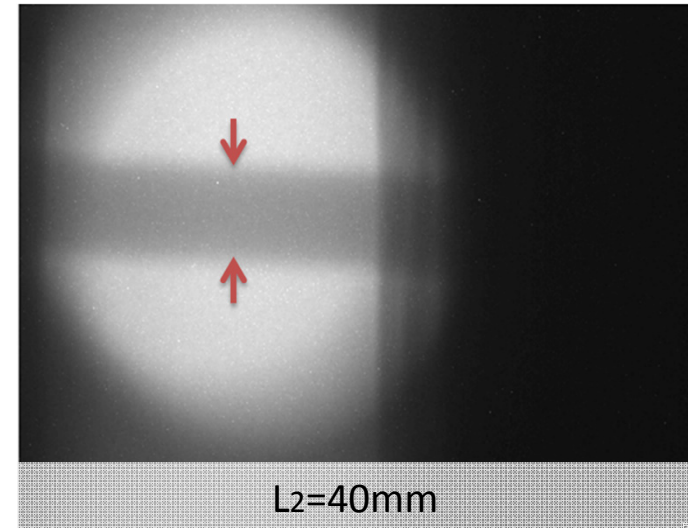
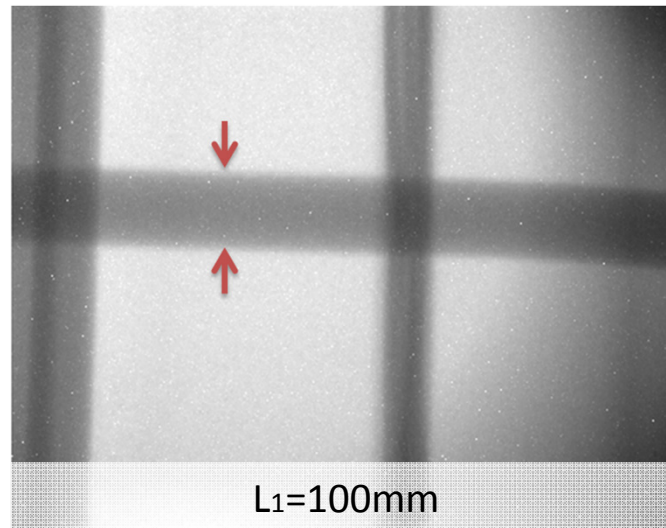
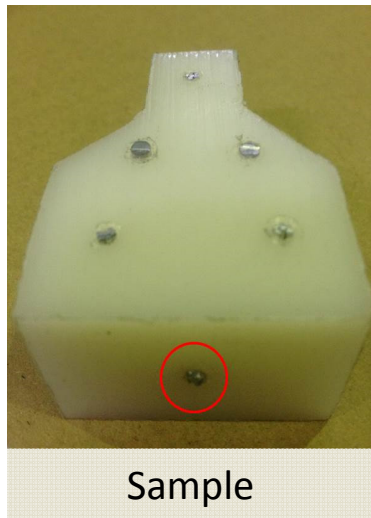
According to the triangle relationship

$$\begin{cases} \sin(\theta_1/2) = \frac{R}{D_1} \\ \tan(\theta_1/2) = \frac{R_1}{L_1} \end{cases} \quad \begin{cases} \sin(\theta_2/2) = \frac{R}{D_2} \\ \tan(\theta_2/2) = \frac{R_2}{L_2} \end{cases}$$

The real radius is estimated as

$$R = \Delta L / \left(\frac{\sqrt{L_1^2 + R_1^2}}{R_1} - \frac{\sqrt{L_2^2 + R_2^2}}{R_2} \right)$$

Quantitative Evaluation Method by Radiography



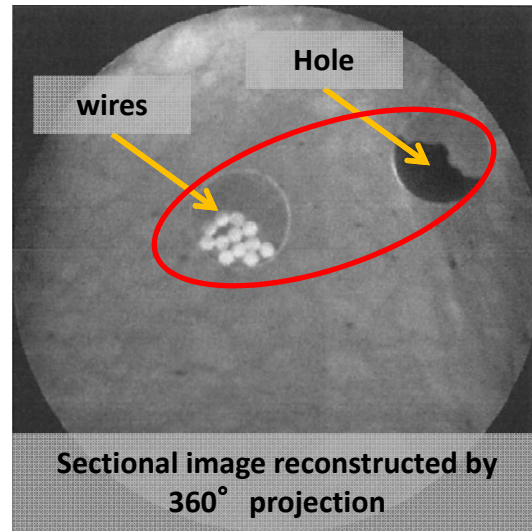
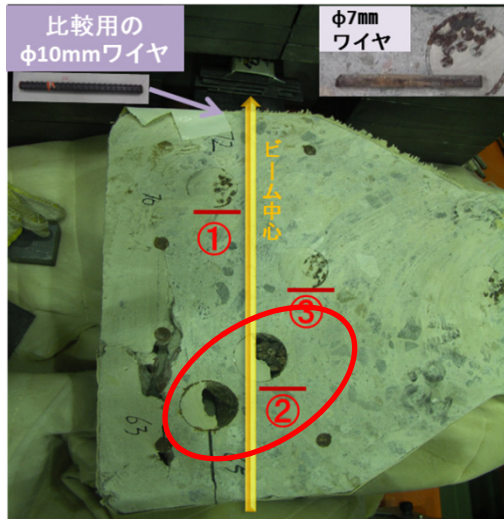
Real radius	1.5mm
R ₁	1.84mm at $L_1=100\text{mm}$
R ₂	2.80mm at $L_2=40\text{mm}$
R	1.4986mm
Error	0.09%

Beam source	Object	Detector
50keV X-ray tube	Al rod in plastic sample	CCD camera

- Geometry layout
- Higher detector resolution
- Boundary enhancement
- Evaluate diameter of inner rod

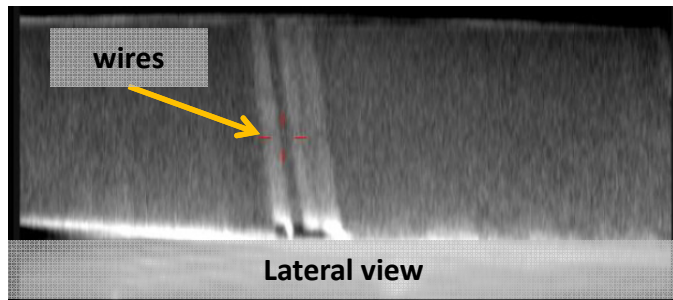
2014/8/25 Experiment date: 2014/5/22

Quantitative Evaluation Method by Partial CT

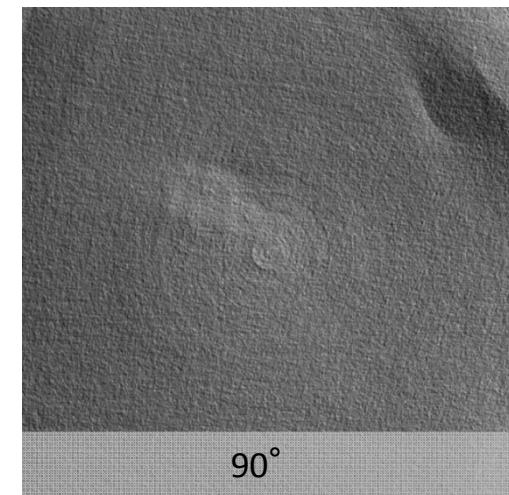
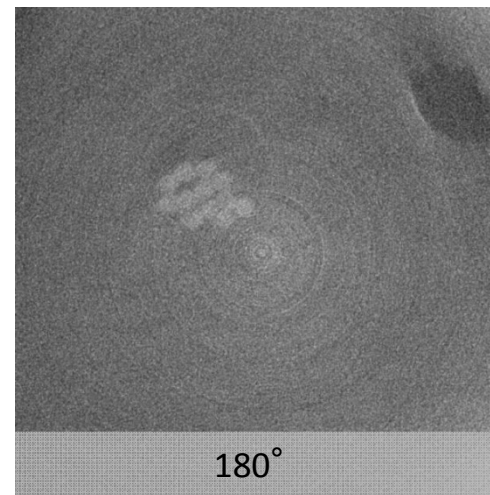


Experiment date: 2014/4/22

Scanning condition	3.95MeV
Angle range	0° ~360°
View number	600
Distance between source and detector	1763mm
Distance between source and rotation center	1153mm

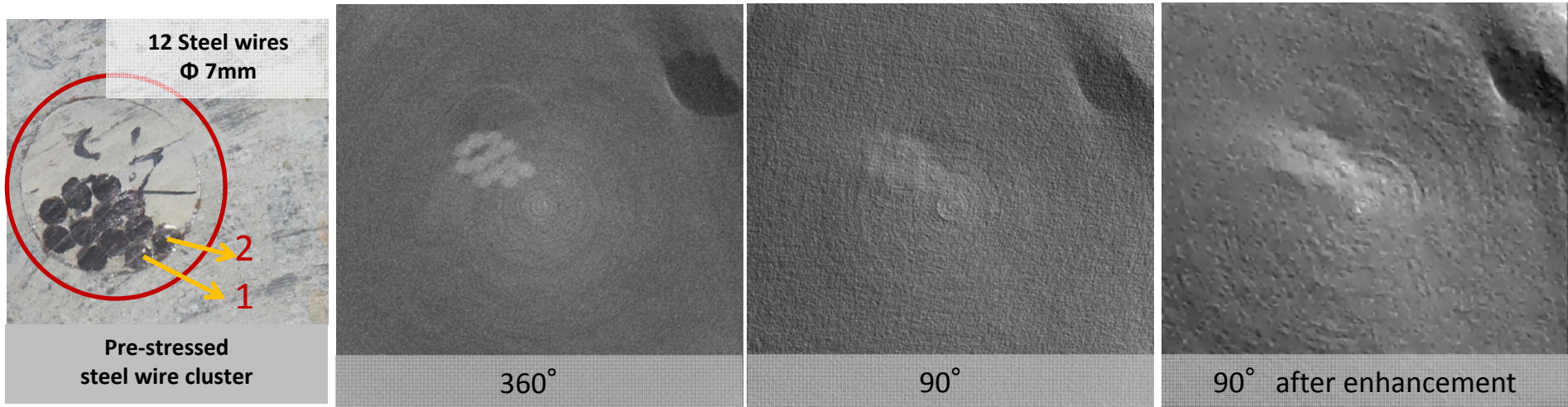


Source	3.95MeV
Detector	Perkin Elmer FPD
Pixel number	2048 × 2048
Pitch	200um



ROI reconstruction with limited angle range

Quantitative Evaluation Method by Partial CT

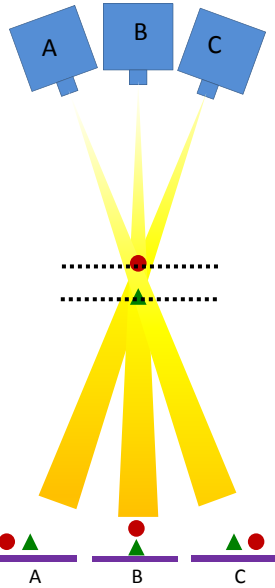


Wire	Min. (mm)		Error		Square	
	360°	90°	360°	90°	360°	90°
1	6.85	10.05	2.14%	43.57%	0.046%	18.984%
2	6.90	15.75	1.43%	125%	0.020%	156.250%

- Imaging denoising and enhancement is necessary
- Scattered X-ray noise affects the accuracy

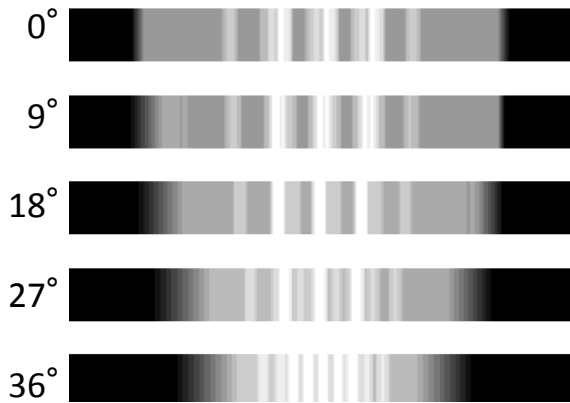
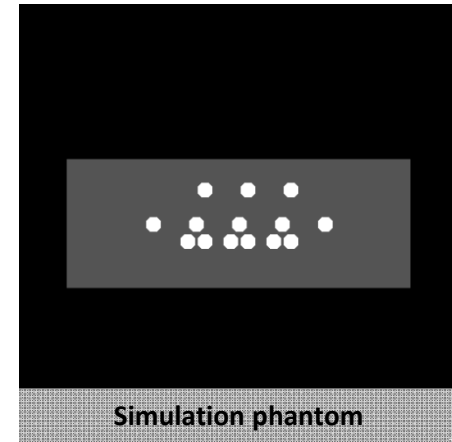
2014/8/25 60° x 2 スキャンCTでほぼ円形の再構成に成功(次回発表します)

Quantitative Evaluation Method by Tomosynthesis

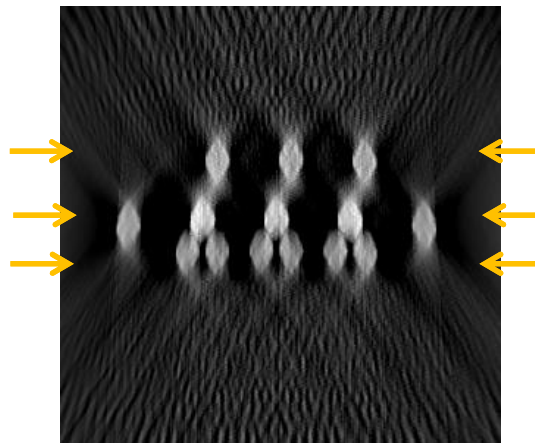


- Only need scanning in several directions
- Image enhancement at the slice
- Reconstruct image of section
- Provide details in a thin plane

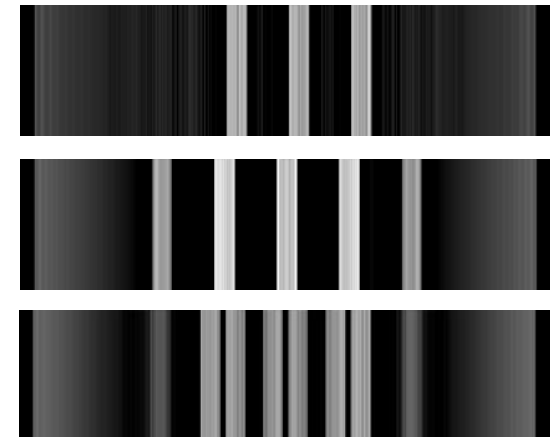
Reconstruction using 25 Projection
(every 3° for $\pm 36^\circ$)



Projection



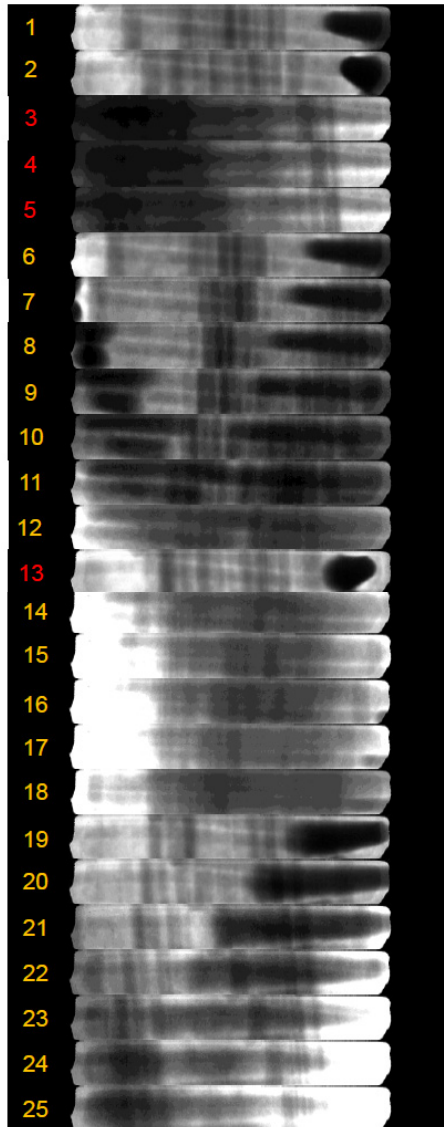
Section



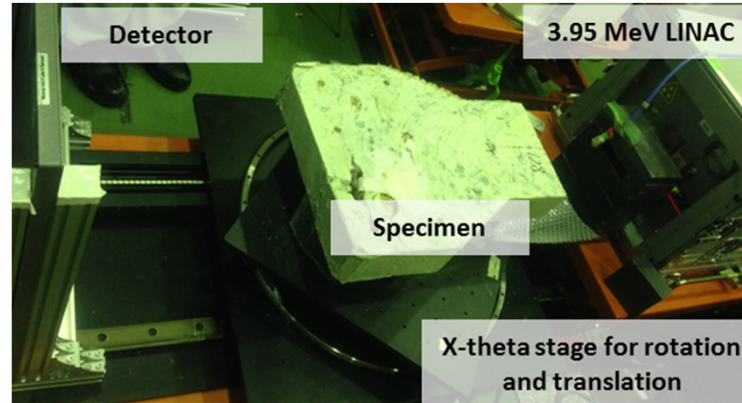
Plane

2014/8/25

Quantitative Evaluation Method by Tomosynthesis



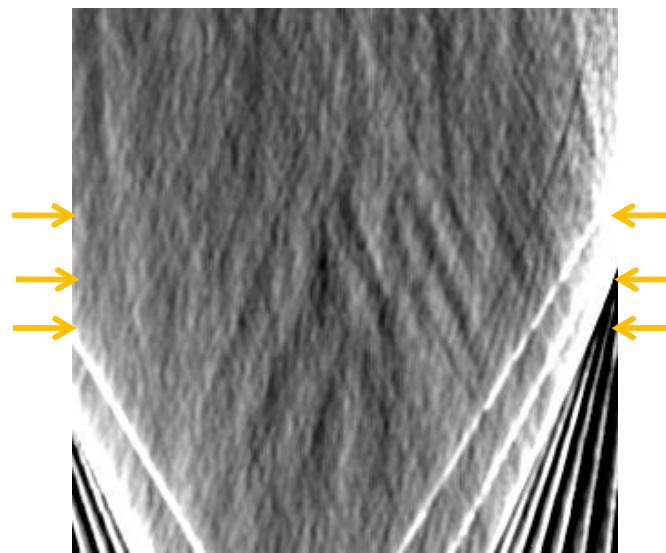
Projection



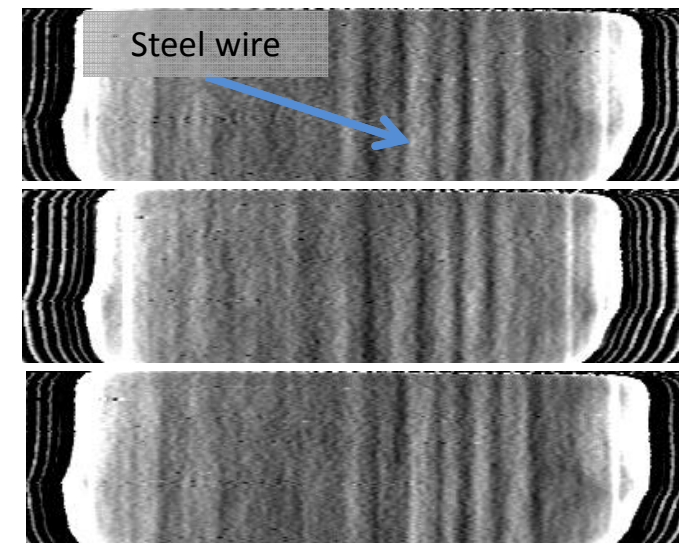
Experiment date: 2014/6/20

Reconstruction using 25 Projection
(every 3° for $\pm 36^\circ$)

Real diameter	7mm
Estimated diameter	6mm
Error	14.29%



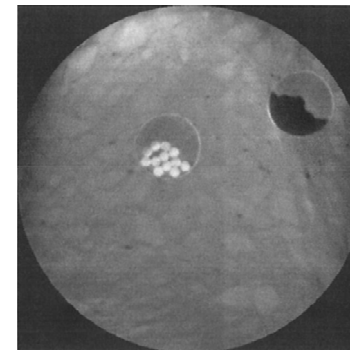
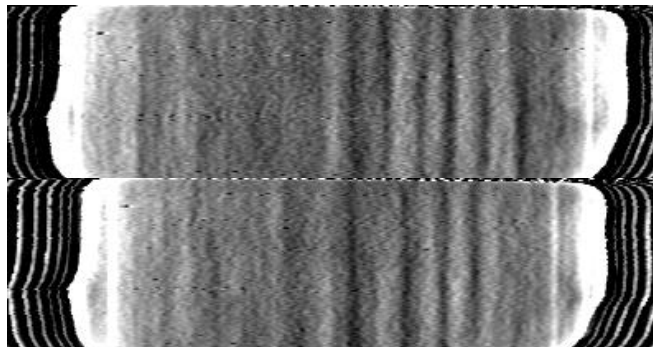
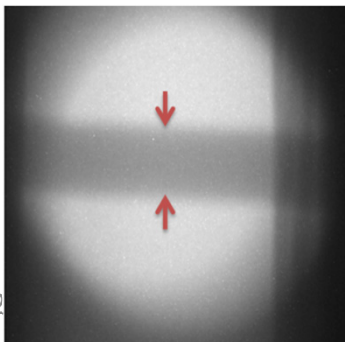
Section



Plane

Quantitative Evaluation Methods Comparison

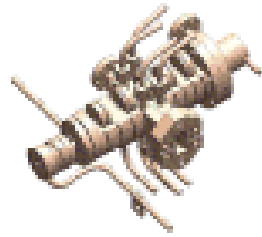
Method	Application	Improvement
Radiography	<ul style="list-style-type: none"> Evaluate diameter of single inner RC rebar Easy to apply 	<ul style="list-style-type: none"> Geometry layout Detector resolution Boundary enhancement
Tomosynthesis	<ul style="list-style-type: none"> Evaluate diameter of PC wire within bundles Several scanning 	<ul style="list-style-type: none"> Scattered X-ray noise reduction Contrast strengthening
Partial CT	<ul style="list-style-type: none"> Evaluate diameter of PC wire within bundles Projection in limited angle range 	<ul style="list-style-type: none"> Scattered X-ray noise reduction Imaging denoising and enhancement



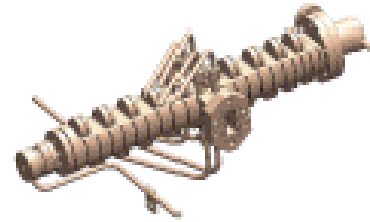
X線発生装置



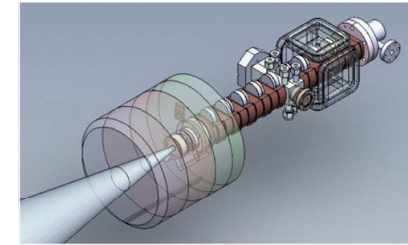
300keV X線管



X-Band Linac 950keV



X-Band Linac 3.95MeV



X-Band Linac 6MeV

エネルギー

Low

High

対象物



~1cm厚 鉄配管



~3cm厚 鉄配管



~1m厚 コンクリート



~2m厚コンクリート

2次元検出器

フラットパネル

イメージングプレート

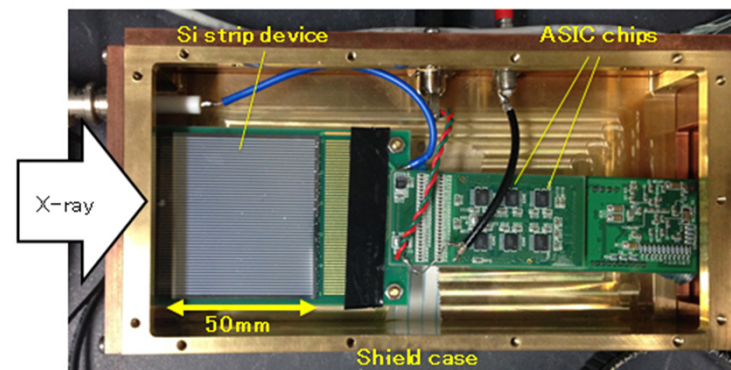
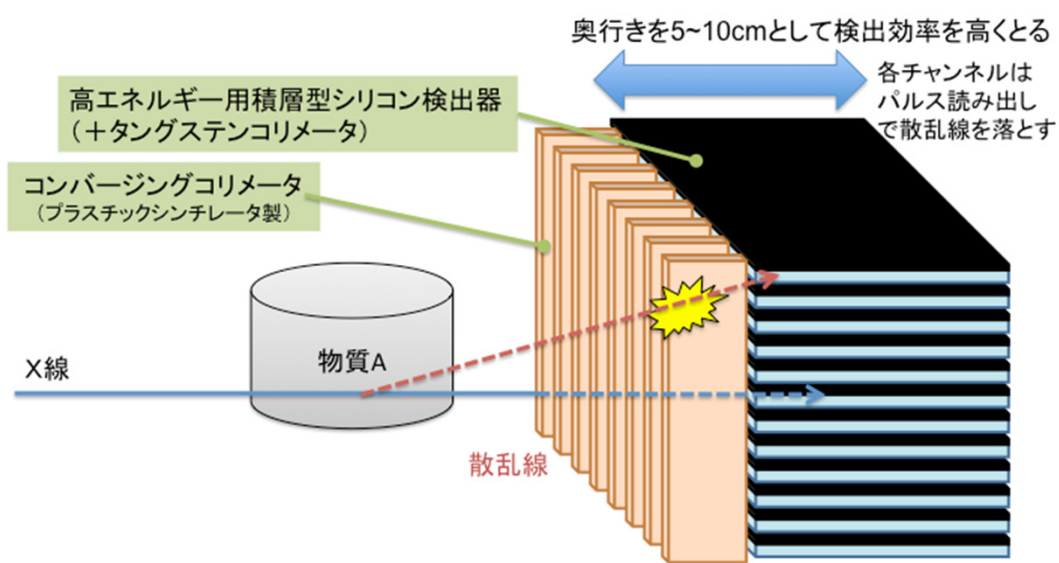
SPECT

CdTe

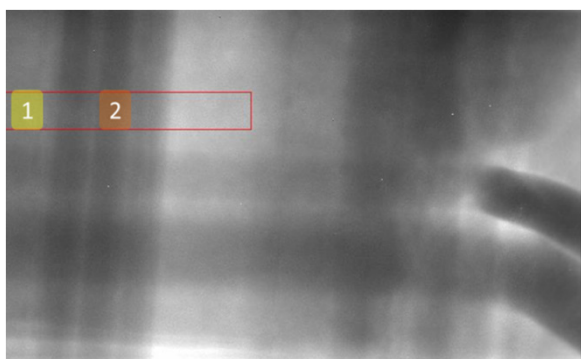
本研究で開発する領域

MeV X線に対して10%以上の検出効率

高エネルギーX線検出用積層型シリコンストリップ型検出器の開発 『JST原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ』

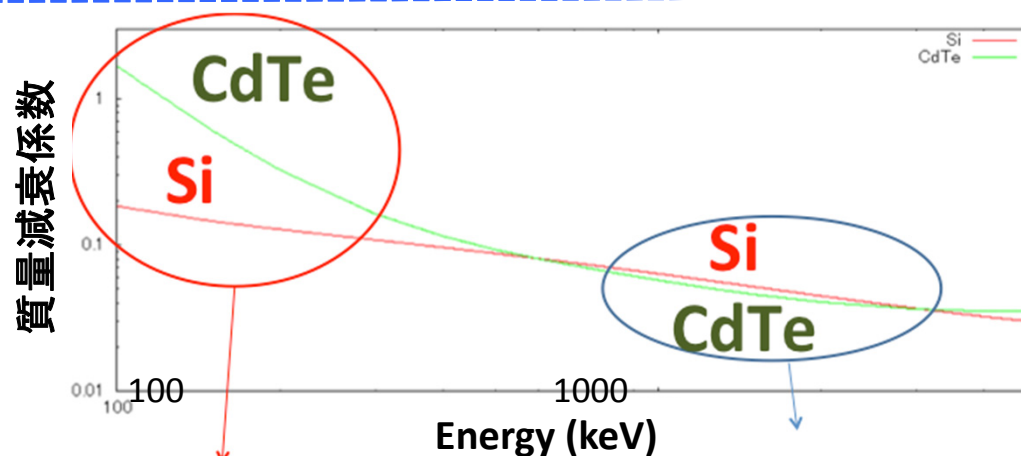


開発現状
5cmx5cmモデル



従来の検出器の散乱線によってぼやけたイメージ

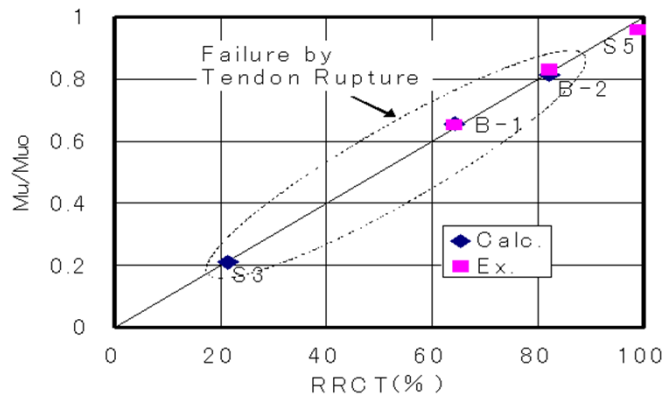
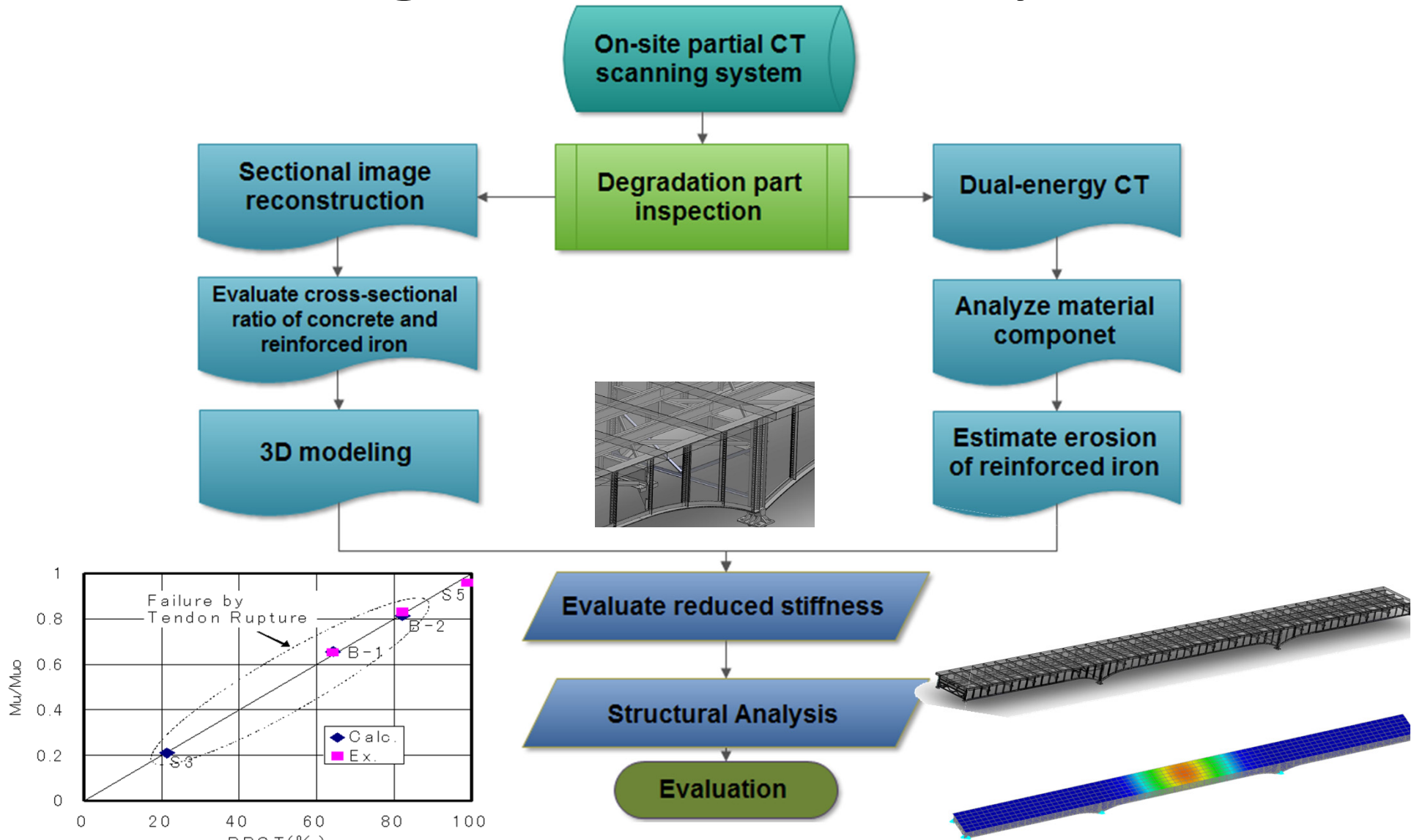
散乱線をカットし、信号X線の検出効率をいかに向上させるかが課題



Siでは低エネルギー側に存在する散乱線は検出にくい

厚い被写体を透過してきたX線を、電子対生成等により電子・陽電子に変換し効率よく検出

Large Structural Analysis



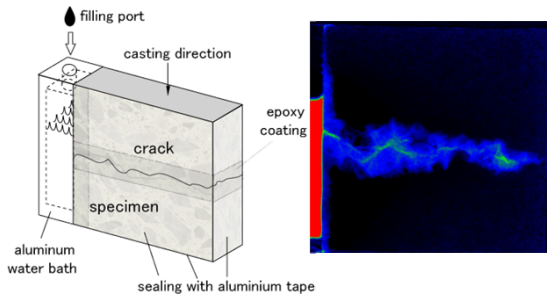
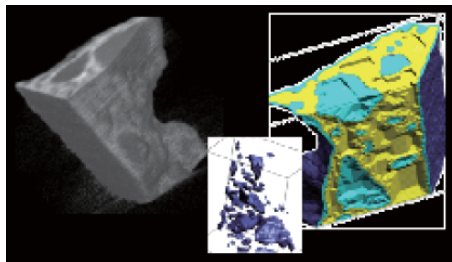
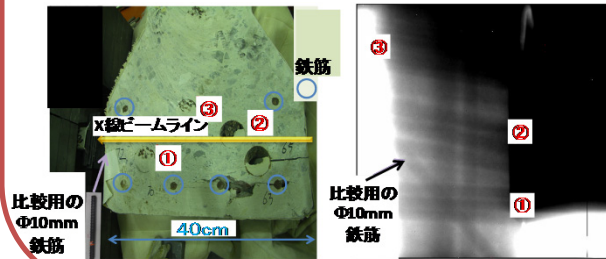
塩害PC桁の、鋼材断面減少率と耐荷力低下率の関係

理化学研究所ものづくり高度計測技術開発チーム

非破壊検査による健全度評価

高出力X線や中性子源による
コンクリート内部の可視化

➡ 鋼材の腐食率やコンクリートの状態が非破壊で把握



載荷試験



解体調査

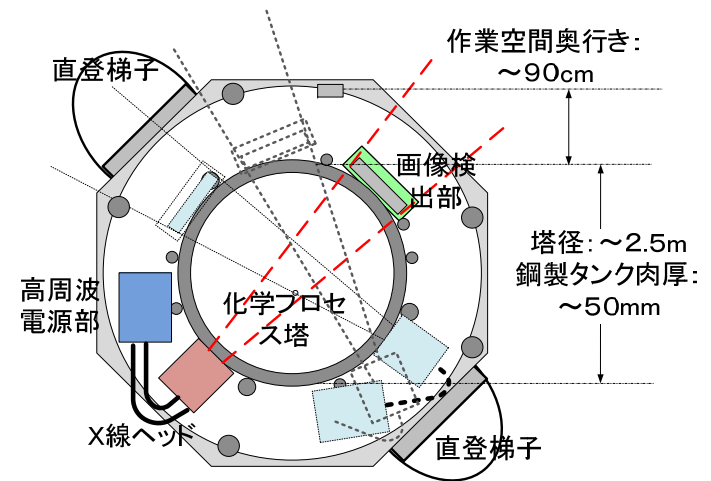


載荷試験による
耐力評価や解体調査
による内部の確認

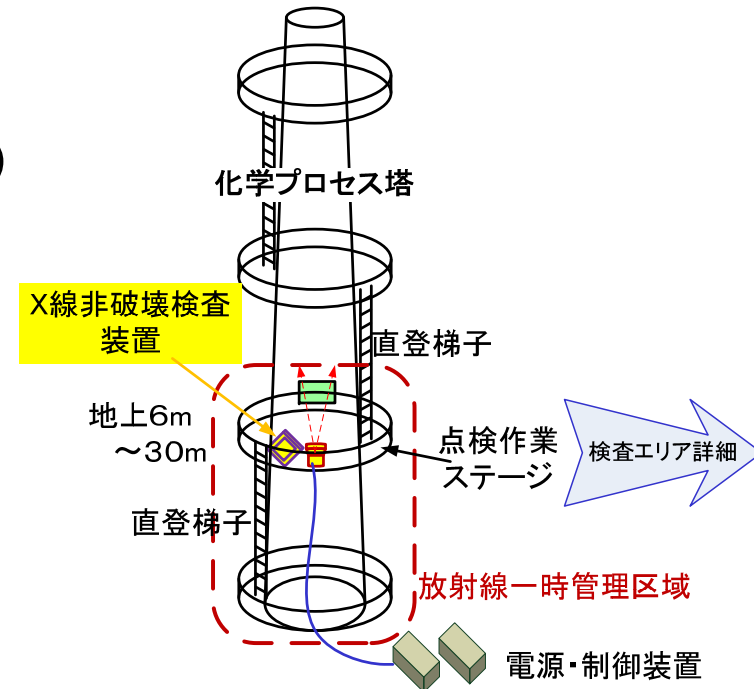
- 非破壊検査技術の適用性検証
- 非破壊検査による健全度評価

950keVシステムの法順守

- 放射線障害防止法に該当しない
- 電離放射線障害防止規則に準じて、局所遮蔽設定、 $1.3\text{mSv}/3\text{ months}$ の管理区域の設定と管理
- 新規製作の場合、製作地の労働基準局に申請
- 試験実施地では申請不要
- 廃棄時は手続きなし



検査エリア詳細平面図(典型例)



3.95MeVシステムの法順守

- 放射線障害防止法の平成17年度変更によって、橋梁に限って4MeV以下までその場検査が可能となった
- 原子力規制庁に使用場所変更届出し、確認を得る。
- 電離放射線障害防止規則に準じて、局所遮蔽設定、1.3mSv/3 monthsの管理区域の設定と管理
- 新規製作の場合、放射線障害防止法に基づき、原子力規制庁に申請
- 試験毎に原子力規制委員会に、使用場所変更請出
- 廃棄時は手続きあり

橋梁特定検査への適用へ

- 平成24年笹子トンネル天井板落下事故以降、社会インフラの安全性向上のため、平成26年度より5年に一度の定期検査(目視・打音等によるスクリーニング)が義務付けられた。
- 定期検査でのスクリーニングの後、さらなる詳細検査箇所を摘出し、特定検査を実施。そこへの適当を目指したい。
- 当方は、目視・打音等によるスクリーニング、さらなる詳細検査箇所を摘出、X線検査実施、構造強度劣化評価、補修のプロセスは、化学工場棧橋鉄筋コンクリートにて実施経験済み。
- X検査手法として、X線源は950keV/3.95MeVシステムの使い分け、検出系はX線フラットカメラ、イメージングプレート、新規開発の高エネルギーX線カメラ、内部構造再構成はマルチ投影法、部分角度CT、Tomosynthesis等の最適組み合わせを採用することになる。今後のその場検査の経験を反映させていきたい。
- 安全対策につき、放射線障害防止法に順じた原子力規制委員会への使用場所変更届出、電離放射線障害防止規則に順じて、局所遮蔽設定、1.3mSv/3 monthsの管理区域の設定と管理

まとめ

- 東大・アキュセラ共同開発体制により、東海村にて、可搬型950keV/3.95MeV Xバンド(9.3GHz)ライナックX線源が完成された。設計仕様すべて達成された。
- 操作性改良950keVシステムにて、実用その場検査が定常化。来年度は国際展開検討。
- マルチ投影法・部分角度CT法・Tomosynthesis・Waveletノイズカット境界強調画像処理法により、コンクリート内部鉄筋の形状を1mm程度で評価に目途。
- 950keV,3.95MeV/6MeV X線源用高感度シンチレータおよびX線カメラの開発中。
- 3.95MeVシステムの管理区域外使用において、原子力規制委員会に使用場所変更届出し、8月にヒアリング。安全確認後、土木研究所・国土総合技術政策研究所での実機大型切り出し試料で演習。その後茨城県と共同で県内橋の検査を開始。
- 全国70万橋の特定検査への適用を目指した。

謝辞

CT技術に関して

(株)XIT

小石川篤氏、村田健太郎氏、他

TOMOSYNTHESISに関して

(株)AXION—JAPAN

櫻井栄男氏、他

法政大学

尾川浩一教授、貝吹太志研究員