

理研中性子源による新たな展開

 -RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source-

2016年12月27日 京大原子炉 検討会IV

大竹淑恵 Yoshie OTAKE yotake@riken.jp

理化学研究所 光量子工学研究領域 (RAP)
中性子ビーム技術開発チーム



須長秀行、竹谷篤、高村正人、小林知洋 若林泰生、水田真紀、池田義雅、吉村雄一 柳町信三、見原俊介、後藤誠
森本秀夫、橋口孝夫、足海正一、



社会に貢献する工学へむけて
Industrial Application of the
neutrons
anytime, anywhere

いつでも、どこでも中性子
手元で使える

理研小型中性子源RANS
線源開発と検出技術は表裏一体

RANS 小型中性子源

- 産業利用事例：**J-PARCも利用。
用途に応じた中性子利用**
 - 日本鉄鋼協会 研究会I (評価分析解析部会) 「小型中性子源による鉄鋼組織解析法」、
 - 文科省 光・量子融合連携研究開発プログラム「ものづくり現場で先端利用可能な小型高輝度中性子源の整備・高度化」

回折による組織評価

- 鋼材変形の前後的に金属集合組織 (結晶粒方向性) 変化観察
- 複相鋼板オーステナイト相分率評価
- 鋼材内部にある腐食と関連する水の動きの可視化から定量化へ
 - 鋼材種類による内部水分量の変化の違い **イメージング**
 - 水分量 定量化→腐食メカニズム解明へ



RANS特徴：高速中性子

• 大型構造物インフラ非破壊観察への挑戦事例：

- SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(藤野陽三PD)

「異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発」(土木研 メンテナンスセンター 石田雅博 代表)

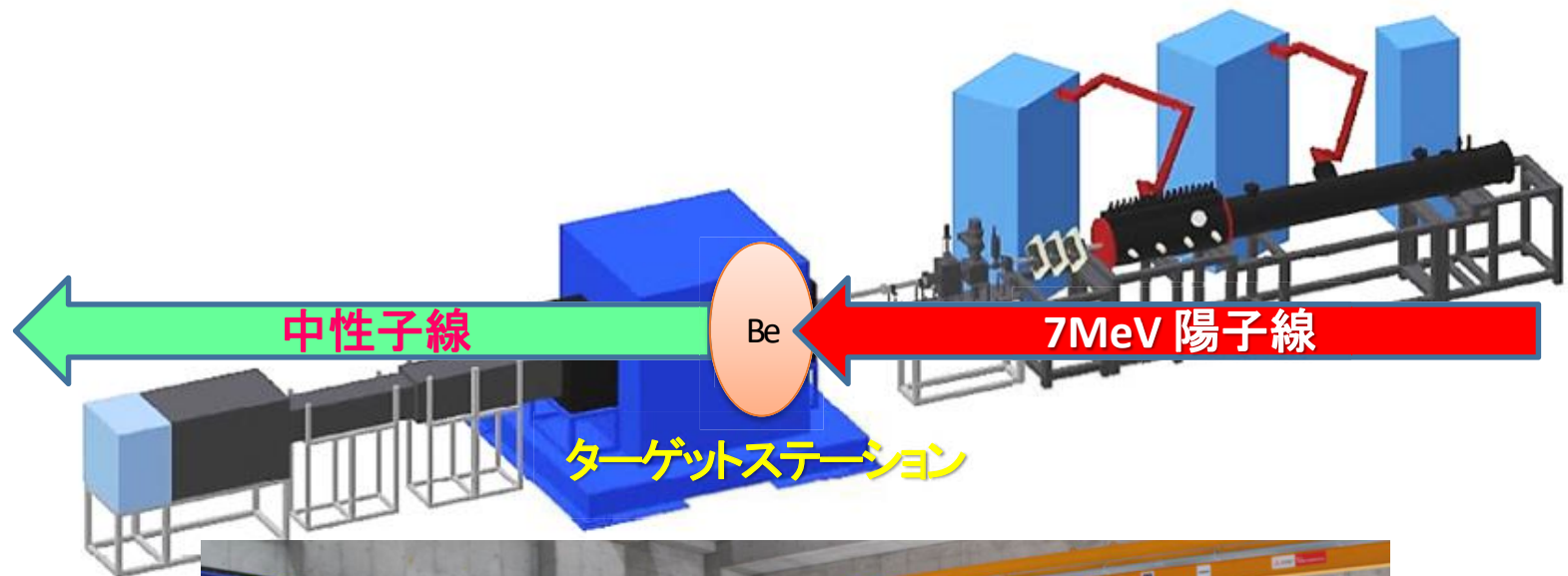
1. コンクリート内鋼材本数の見分け
2. コンクリート内鋼材位置、空隙 観察
3. 中性子誘導即発 γ 線によるコンクリート内部塩検出
4. 反射中性子による路面内部水空隙の可視化
5. 可搬型現場利用開発 RANS2(2.49 MeV)

高速中性子
イメージング

即発 γ 線元素分析

後方散乱TOFイメージング

RANS=RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source

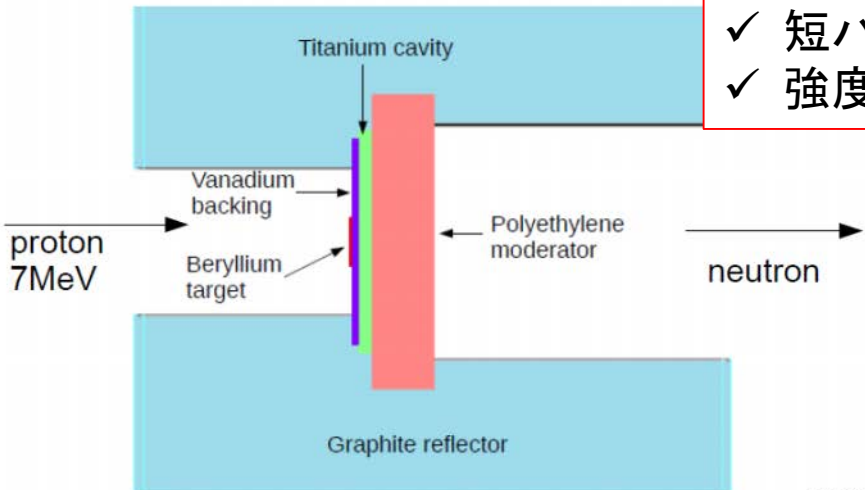


中性子減速材通過後中性子エネルギーとパルス幅

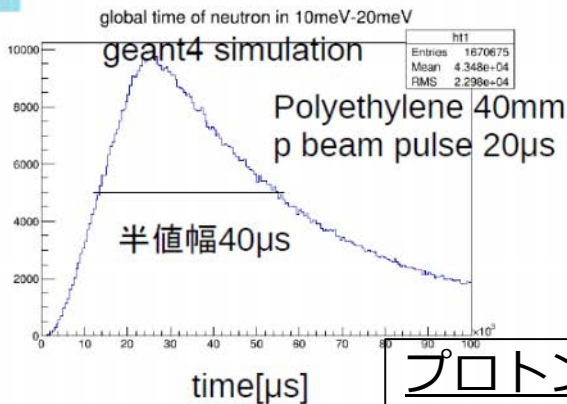
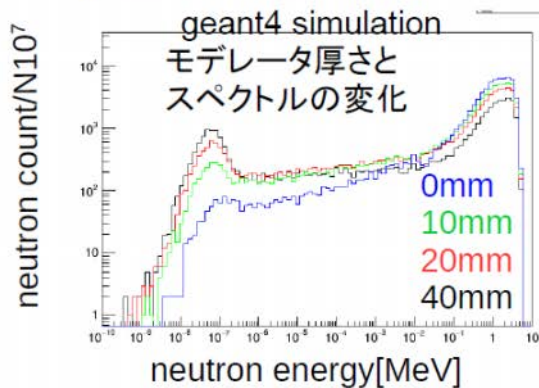
RANSでの

モデレータ入替システム導入(3月-5月高度化改造)

- ✓ 冷中性子モデレータ(山形TL)
- ✓ 短パルス用
- ✓ 強度重視用



10meVのneutronが
5m飛ぶと3.5ms
パルス幅40 μ sなら
時間分解能~1%



プロトン

100 μ A

10-180 μ s

20-180 Hz

平均最高電流

パルス幅

繰り返し周波数



バルクのサンプル鉄鋼組織を現場で観察

理研:高村、池田、須長

JAEA:鈴木裕士

都市大:今福、熊谷

京大KUR:大場

プレス成型(金属)

金属塑性加工現象

サンプルそのまま現場で組織観察!

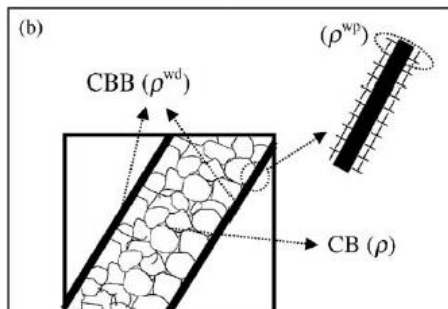
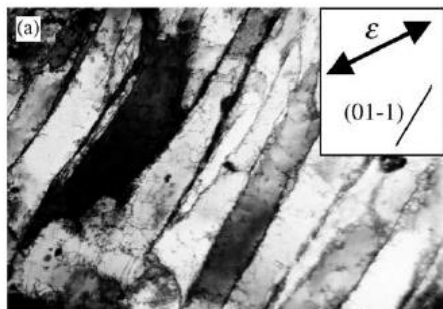
Pulsed neutron TOF measurement

- ・日本鉄鋼協会研究会I (2013, 2014-2016)
「小型中性子源による鉄鋼組織解析法」
新日鉄住金 JFEスチール 神戸製鋼所 大同特殊鋼
- ・光・量子融合連携研究開発プログラム(2013-2017)



金属材料研究 評価分析手法

- TEM, SEM, EBSD = 電子線やX線を利用: **表面だけ**

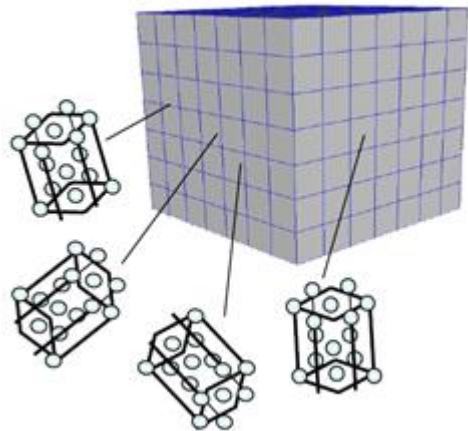


自動車鋼板数ミリの厚さ全体の観察;
中性子だけが透過能解析能可能

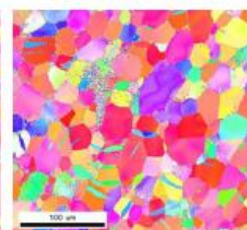
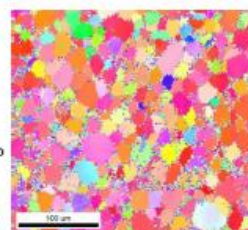
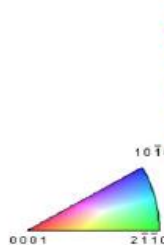
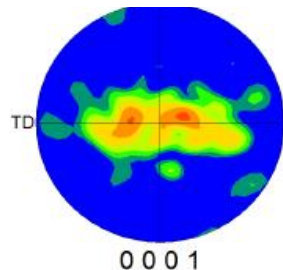


施設が少ない+現場で使えない
新素材は社外秘ばかり(現場重視)

軽量(強度が高い)+易加工材料開発:加工の前後 変化
小型中性子源はバルクのまま現場観察
=金属集合組織(結晶構造)の変化観察



Electron Back Scattering Diffraction Only
surface information Pure Titanium (Prof. T.Hama KyotoU)



点O(変形前)

点P(圧縮後)

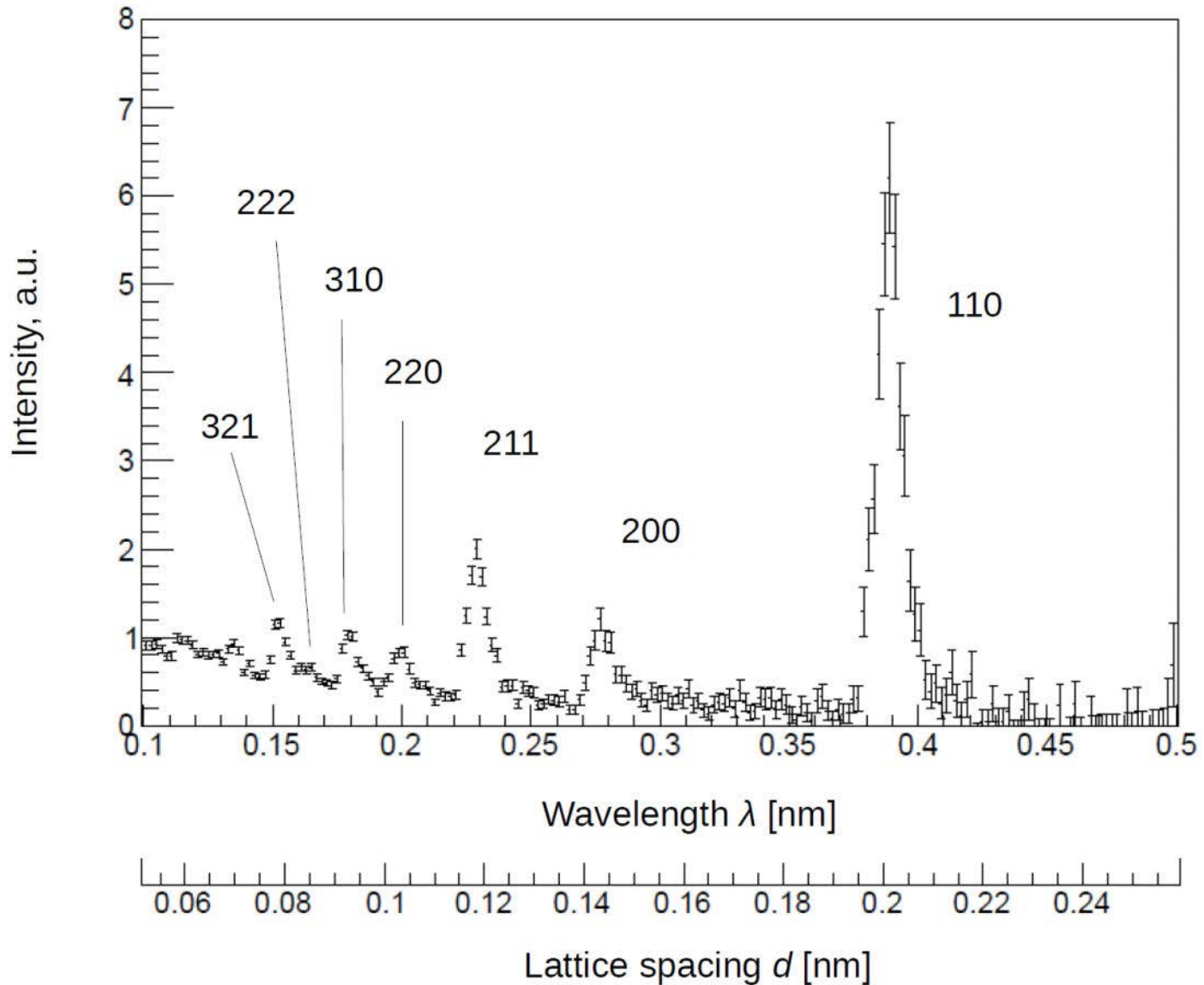
as received

After compression

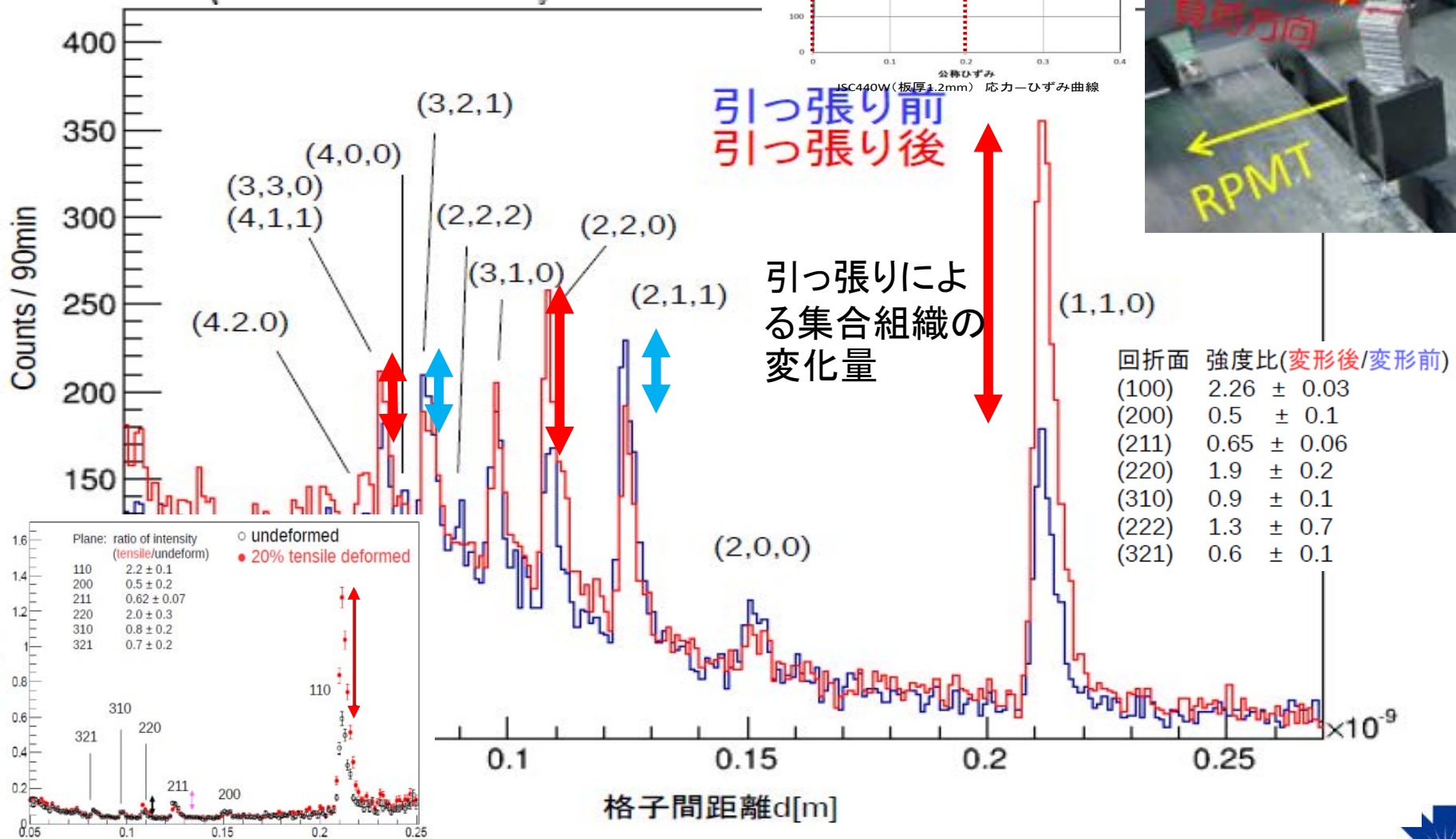
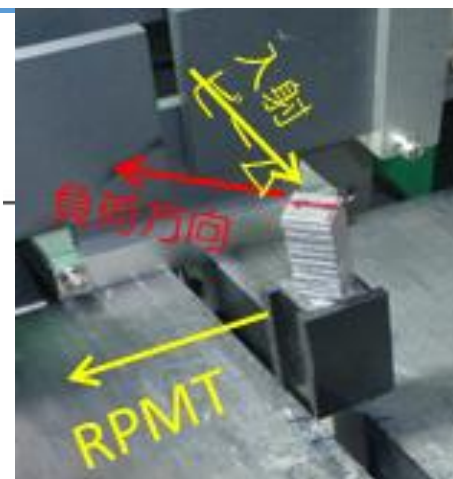
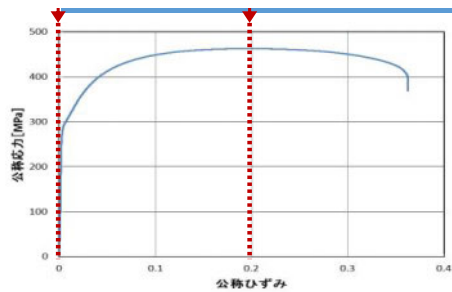
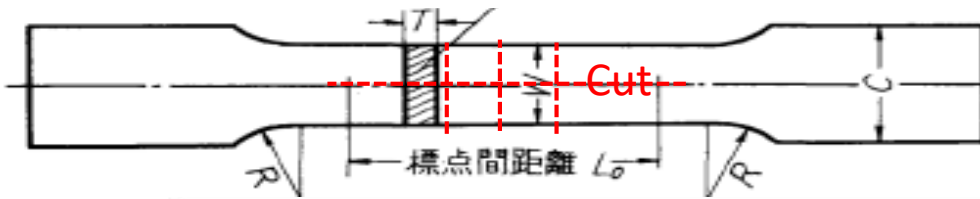


フェライト鋼
1センチ立方

回折角度
150度

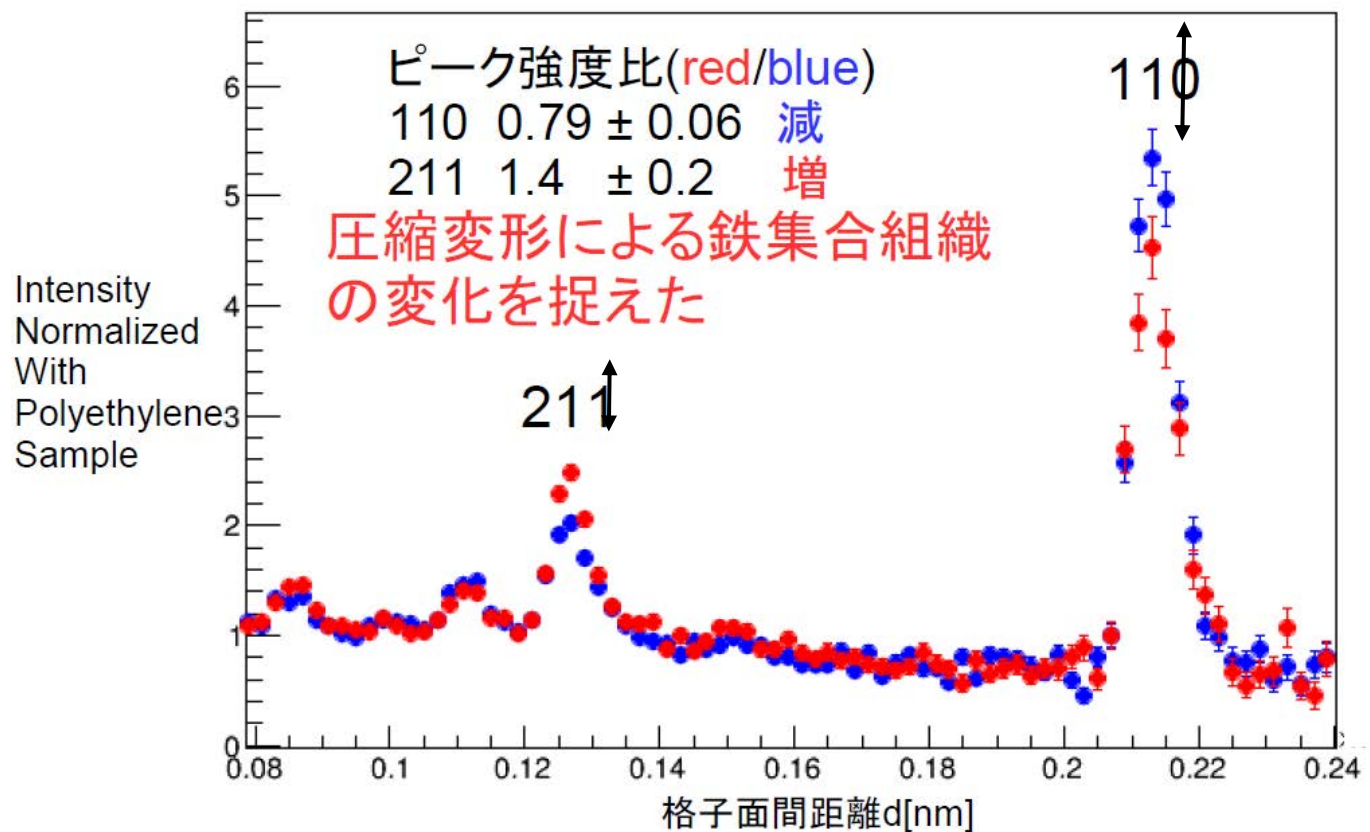


20%引張前後集合組織 (結晶粒) の変化



IF鋼試験片の中性子回折ピーク 10%圧縮変形の影響比較

RD方向を10分測定

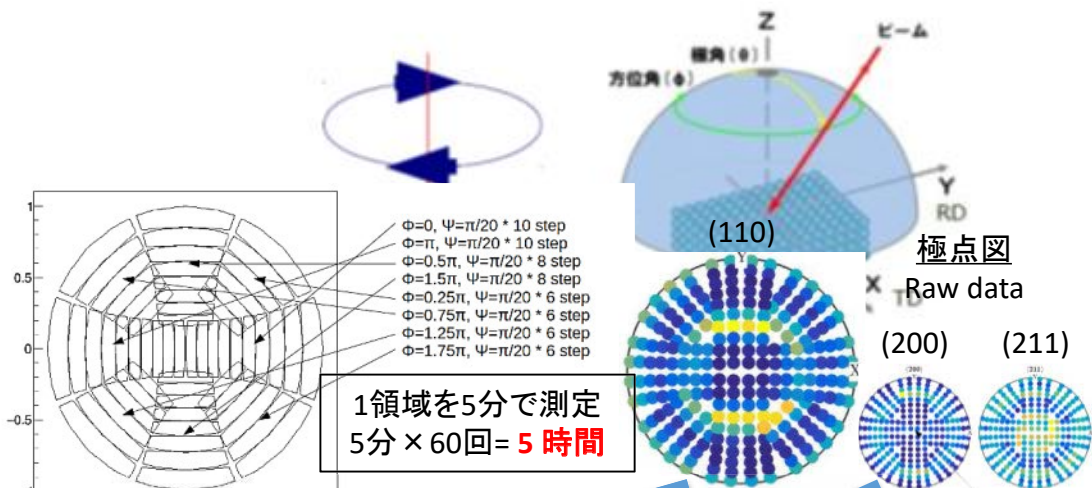


<小型中性子源による集合組織測定技術の開発>

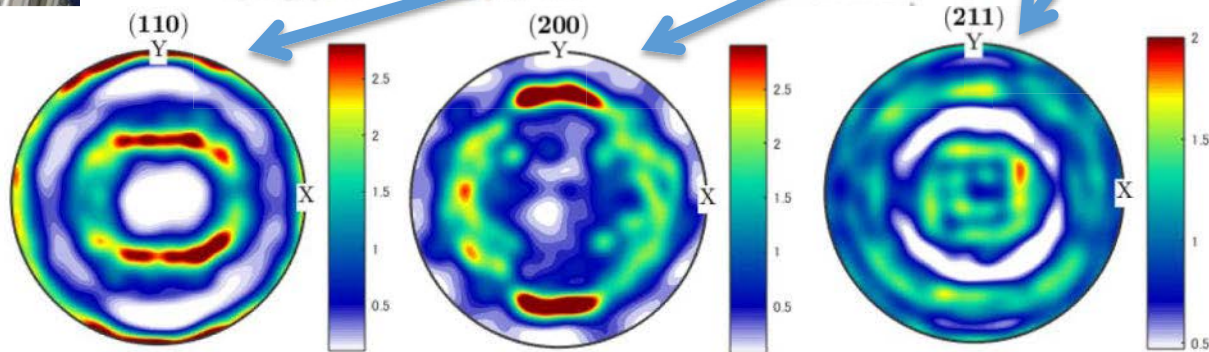


<小型中性子源による集合組織測定技術の開発>

■理研小型中性子源RANSを用いてIF鋼の圧延集合組織の測定に挑戦



Reconstructed Pole figure by MTEX

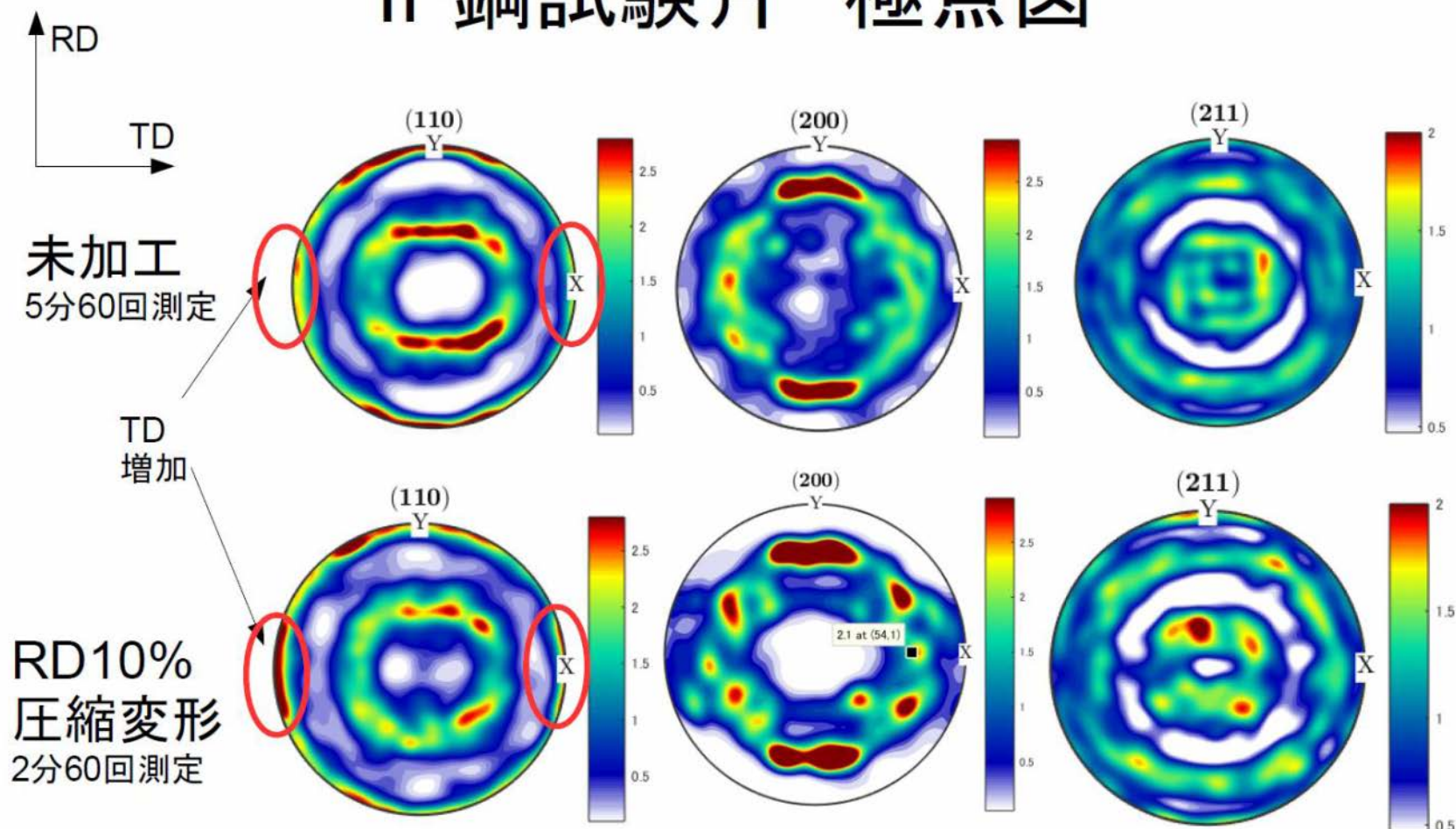


He3-PSD検出器の利用

検出面積および検出効率のゲインにより従来使用のRPMTの10倍を超える測定効率を実現

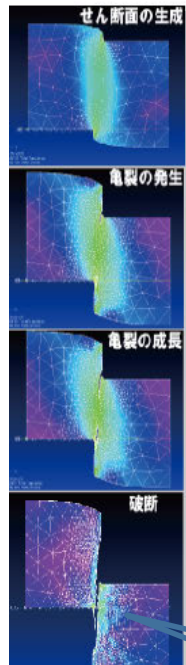
- 世界で初めて小型中性子源による集合組織測定に成功
- 本測定技術の実用化に目途

IF鋼試験片 極点図



圧縮による変化が見える

強度と成形性の両立：バルクで現場評価 現場利用を目指した 鋼中の残留オーステナイト計測挑戦！



– 強度と成形性を両立する
複相鋼(マルテンサイト、オーステナイト)

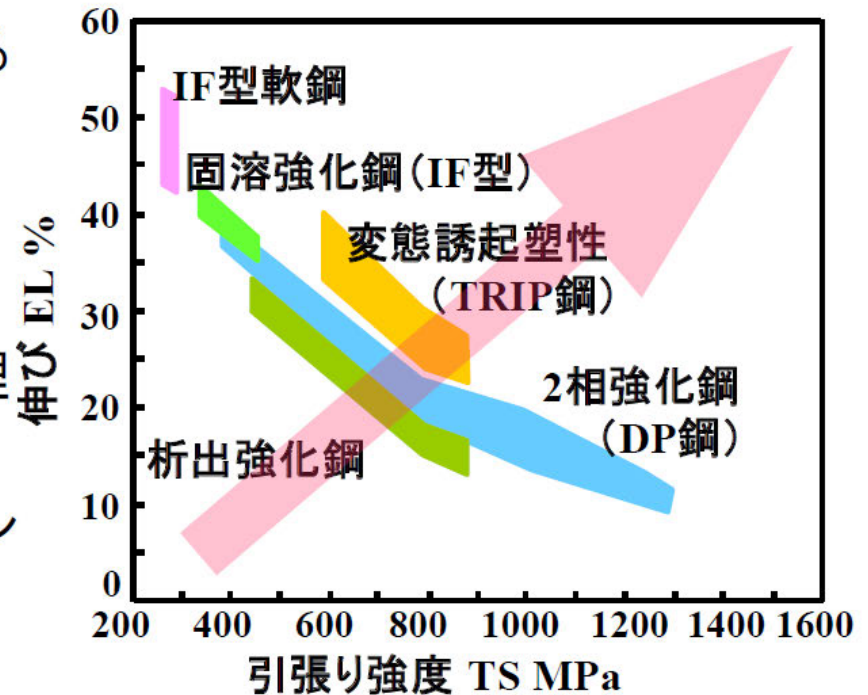
– 結晶学的性質や形態の
方向性を示す

• 材料の塑性変形機構の理
解と工程設計の高効率化

– 塑性加工シミュレーション
の高度化

– 結晶塑性計算、メゾス
ケールからマクロへ

せん断シミュレーション
塑性変形



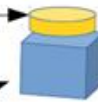
複相鋼中のオーステナイト体積率 (加工性と靱性:強いニーズ)

Quantitative measurement for austenite of dual-phase steel

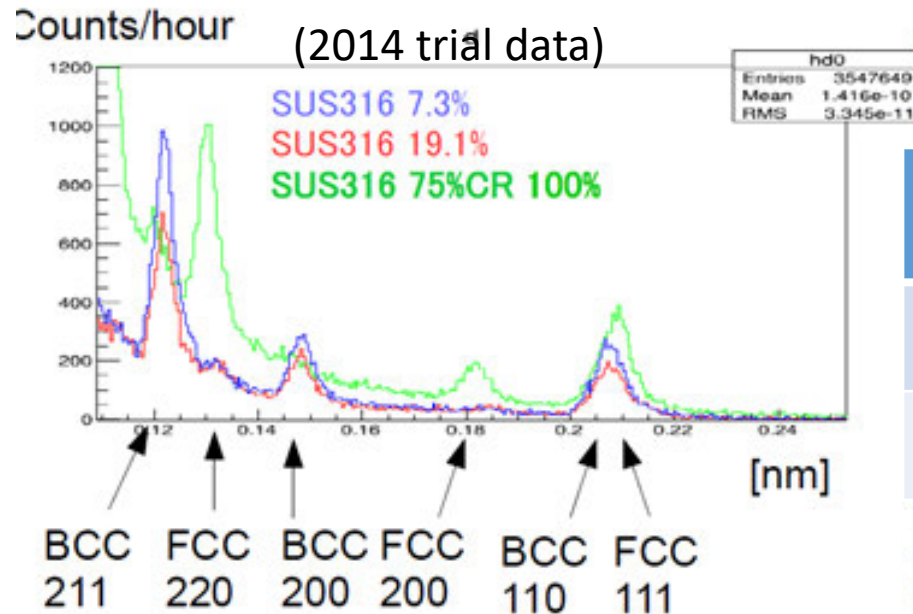


SUS316 25%CR (FCC, Austenite, $\phi 10\text{mm}, w1\text{mm}$)

Annealed SM440A (BCC, Ferrite, 10mm^3)



オーステナイト量 相分率
1%精度で一致



Peaks of both textures are measured

volume fraction from RANS diffraction	実際の体積比
$6.7 \pm 0.8\%$	8.3%
$17.4 \pm 0.8\%$	19.1%

*Rietveld analyzed with Z-Rietveld
R. Oishi et al, Rietveld analysis software for J-PARC
Nucl. Instrum. Methods, A 600 (2009) 94-96



中性子イメージング 鋼材内部腐食と水の動き

理研 竹谷篤、若林泰生、大竹淑恵
神戸製鋼 中山武典氏

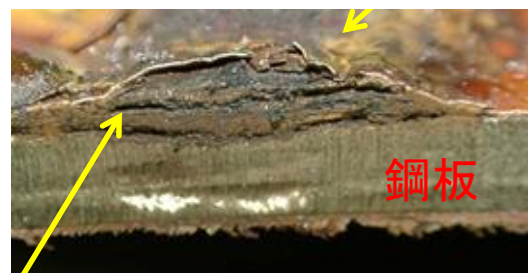
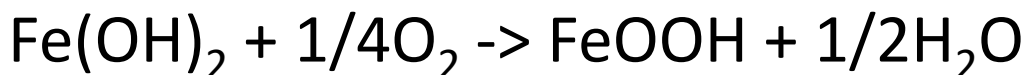
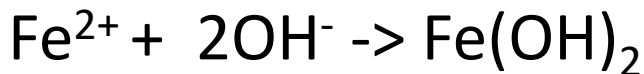
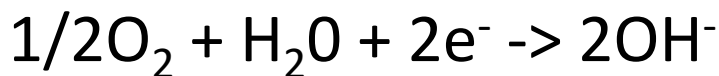
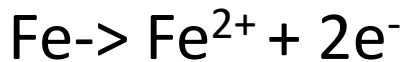
日本鉄鋼協会 評価分析解析部会
研究会「小型中性子源による鉄鋼組織解析法」

腐食に係るコスト(経済損失を含む)は約10兆円(1997年)
(GDPの2%)

表面塗装に係るコスト約3兆円。

- ・ **腐食**はFe, H₂OとO₂の間の酸化還元反応
- ・ 腐食のメカニズムを理解するためには**水の動きを見る**事が重要
- ・ インフラに加え、船や鉄道など腐食は大きな問題

腐食(さび)のメカニズム

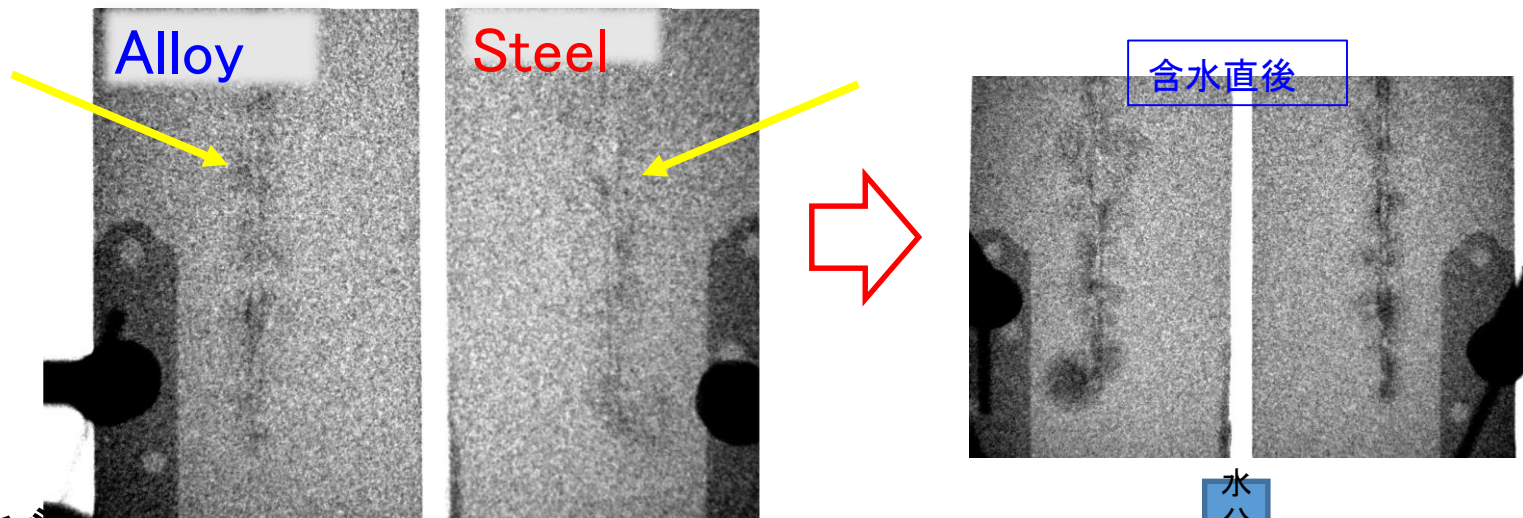


腐食層(空隙や欠陥)

写真: 中山様提供

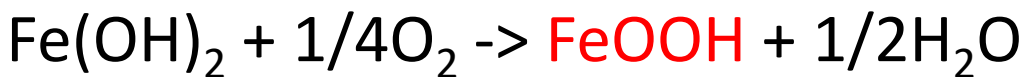
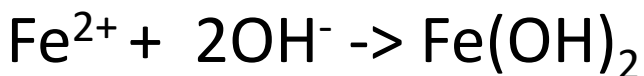
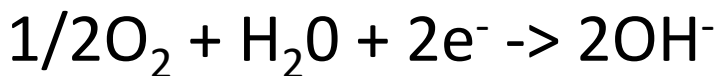


小型中性子源鋼材内部腐食觀察



腐食(さび)

室内常温環境下



30分エア一乾燥後

2時間に渡る水の動きのみ取り出し可視化

普通鋼

合金鋼

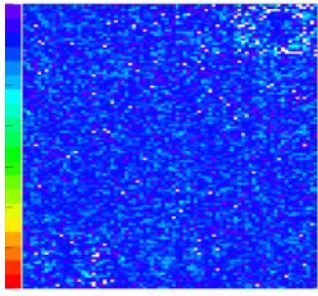
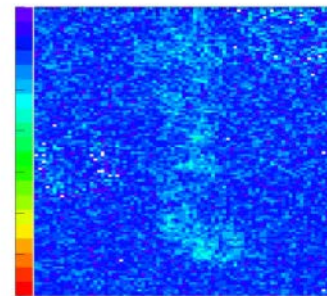
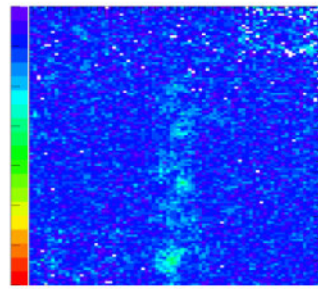
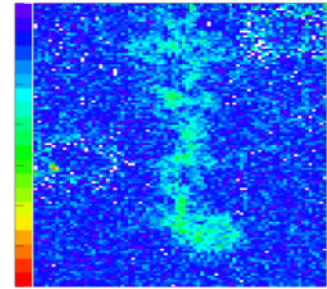
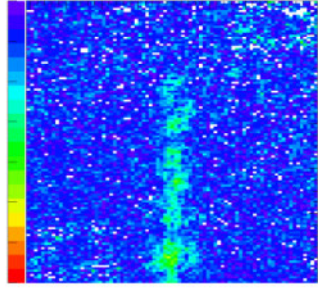
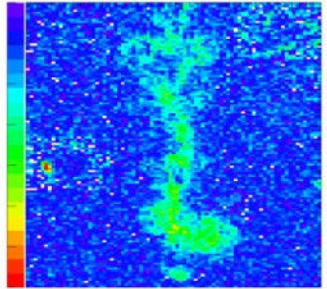
水:飽和状態
(2時間水漬)



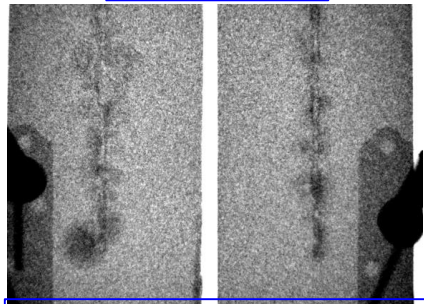
1 hour



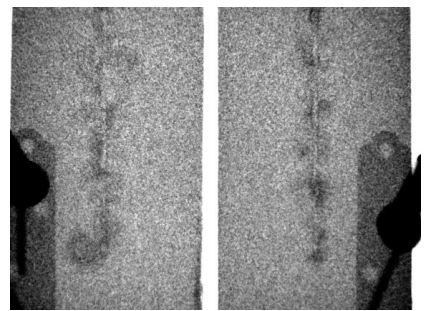
2 hours



含水直後

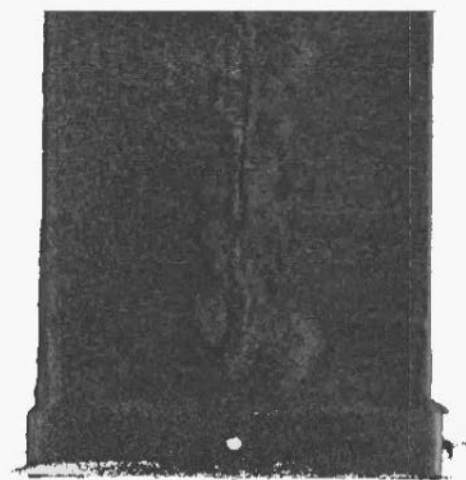
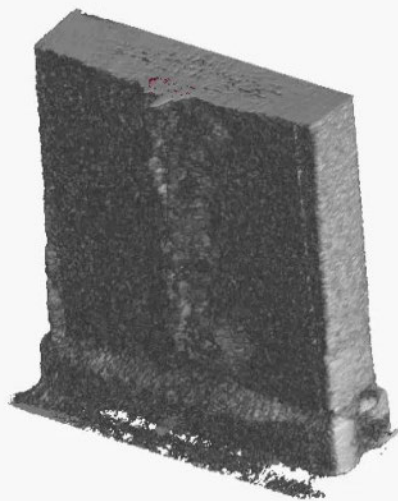


1時間後、2時間後





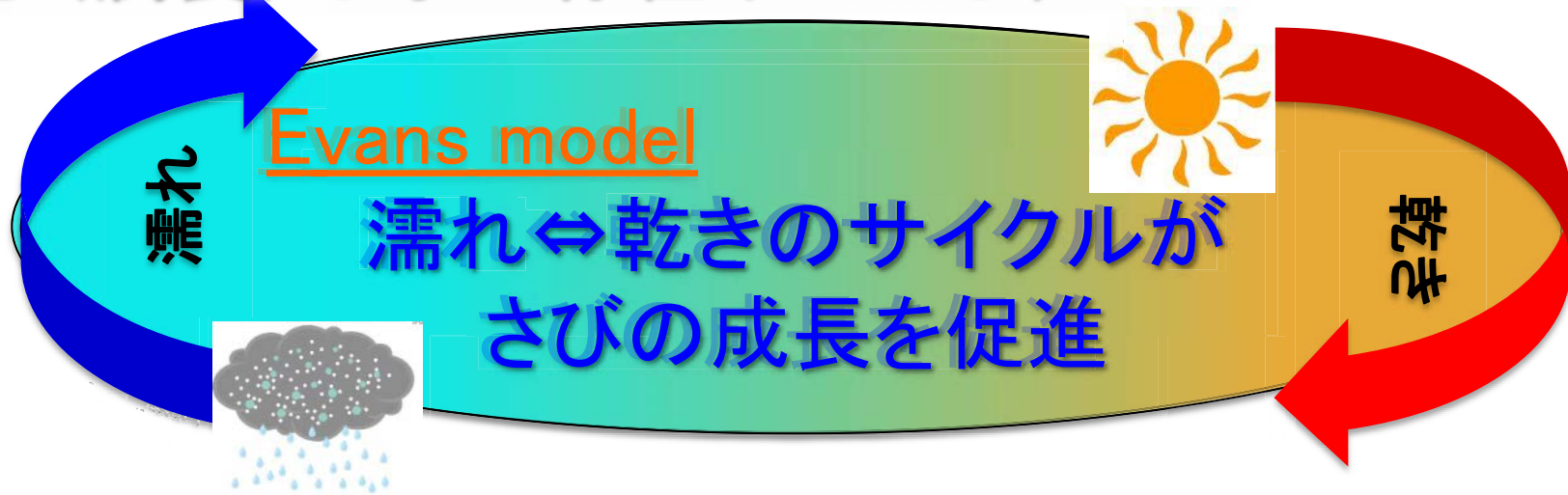
破壊せずに鋼材の中の腐食
(水素)の経年変化を観察可能



赤:水浸鋼材内部腐食

鋼材の最大の敵は さび＝腐食

さび(腐食)は水の存在下で生じ、



RANSの挑戦

非破壊観察

→メカニズム解明へ

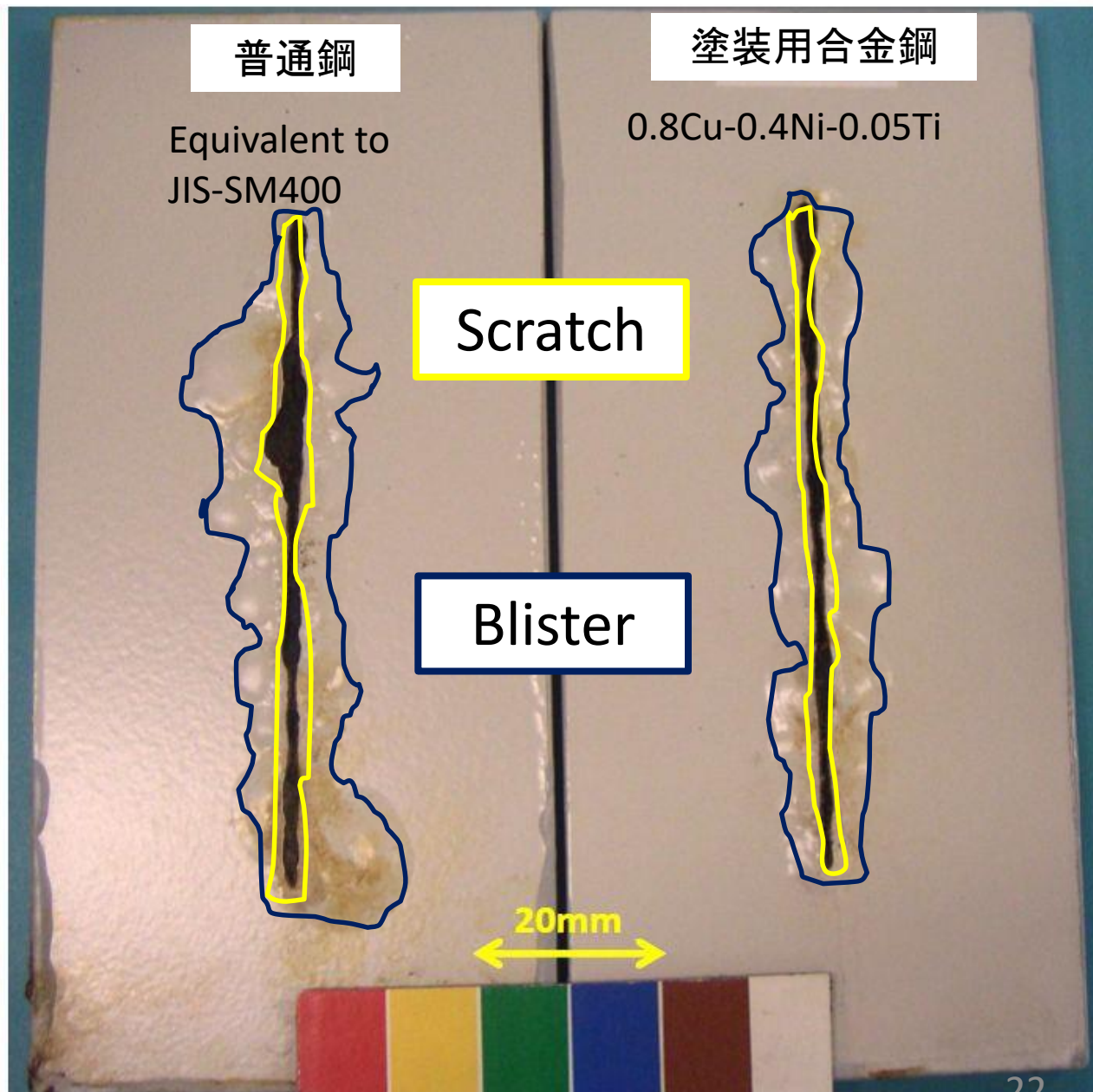
見える化(可視化)→定量化

サンプル: 通常塗装系 / 腐食膨れ・大

- 厚さ 6mm
- 変性エポキシ樹脂
塗料膜厚 240 μm

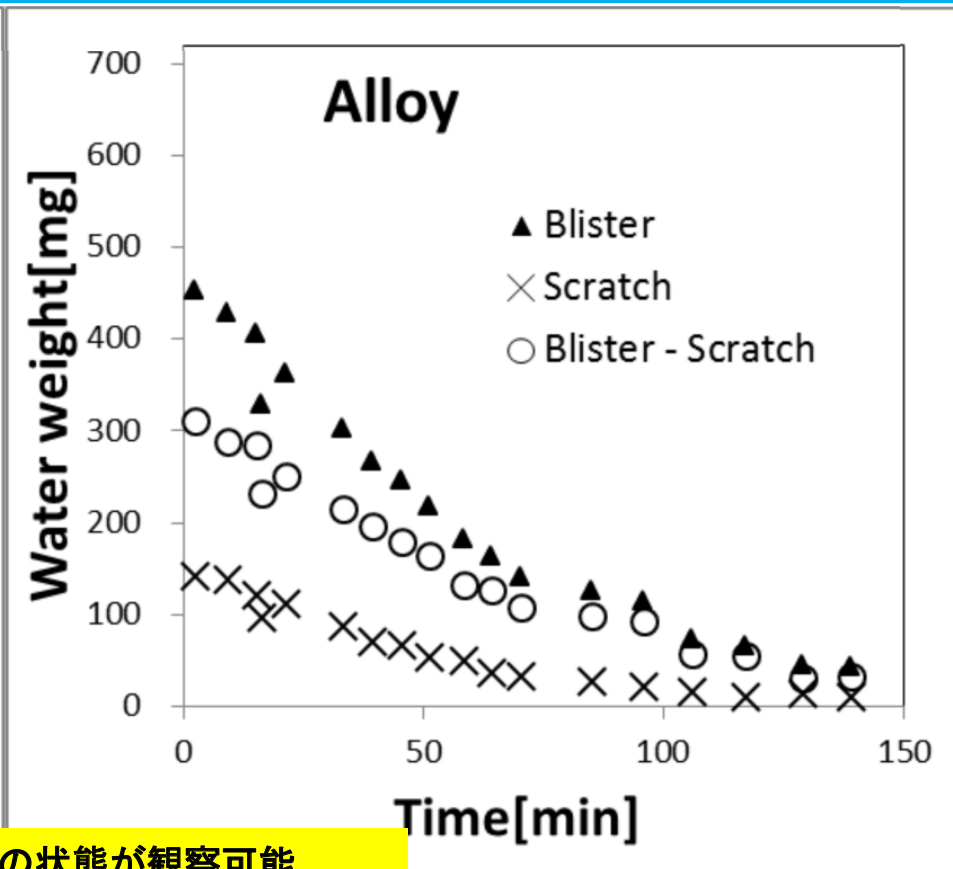
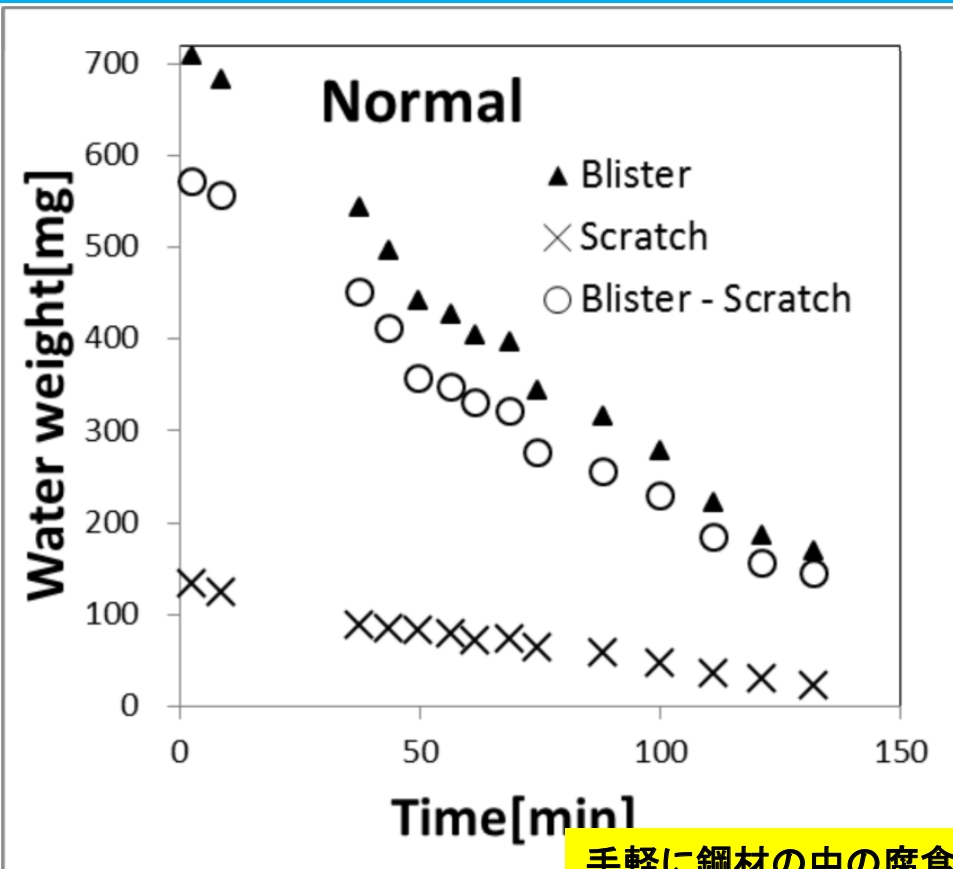
- 1mm幅の傷を塗膜
に付ける

- 塩水噴射と乾燥を
6ヶ月間繰り返す



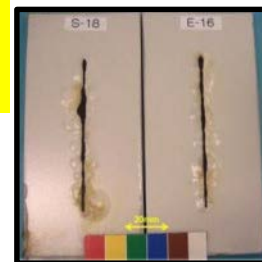
神戸製鋼 中山様提供

中性子線による異種鋼材腐食での水の動き



手軽に鋼材の中の腐食の状態が観察可能
 →腐食メカニズム解明
 RANSで開発した手法をJ-PARC実験へ
 J-PARC BL10実験(2016 3月に実施した)

普通鋼は合金鋼より長く水を保持している。
 従って、普通鋼はさびを生成しやすい。



A.Taketani et al. ISIJ International DOI: 10.2355/ ISIJINT-2016-448

[10.2355](https://doi.org/10.2355)

高速中性子によるインフラ大型構造物 非破壊観察

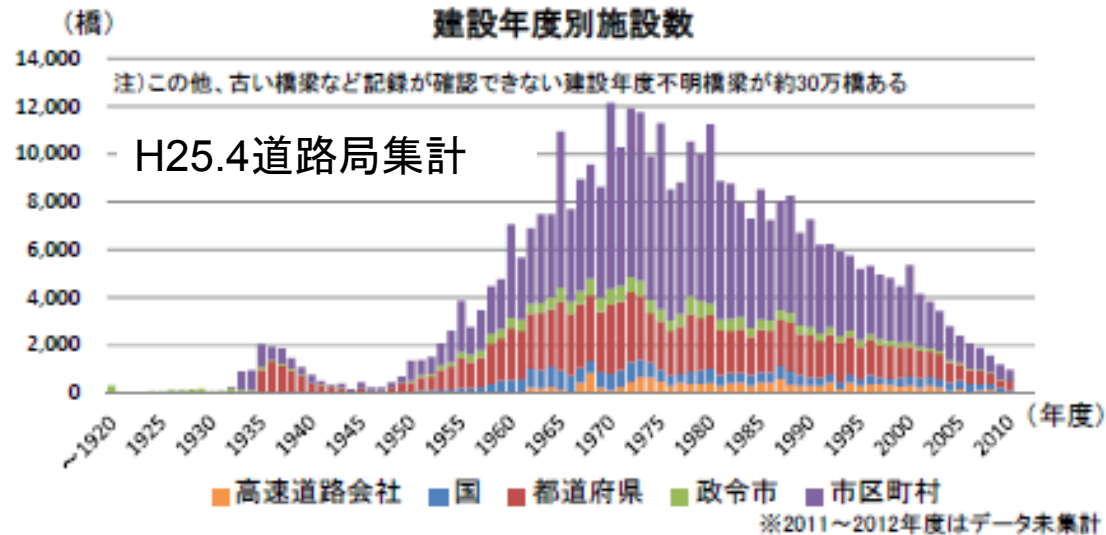
コンクリート内非破壊検査

- ・鋼材破断→本数が減っている個所を見つけられる？
- ・空隙
- ・塩害による劣化→内部の塩分検出
- ・コンクリート内部の土砂化、水分の検出



コンクリート非破壊検査の需要

社会インフラの老朽化



日本にある橋梁の数は約70万

建設後50年を超える橋梁の割合が増加する見込: 18% (H25) → 67% (H45)

維持管理 更新コストの一層の縮減のための技術開発

人命に関わる事故を未然に防ぐため、変状を迅速かつ確実に把握する技術開発

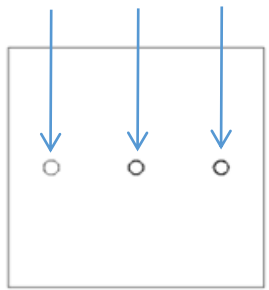
機能・費用を両立した維持管理・更新の実現に資する新技術の導入や技術開発を積極的に推進すべき。

[国土交通省 社会インフラの維持管理の現状と課題]

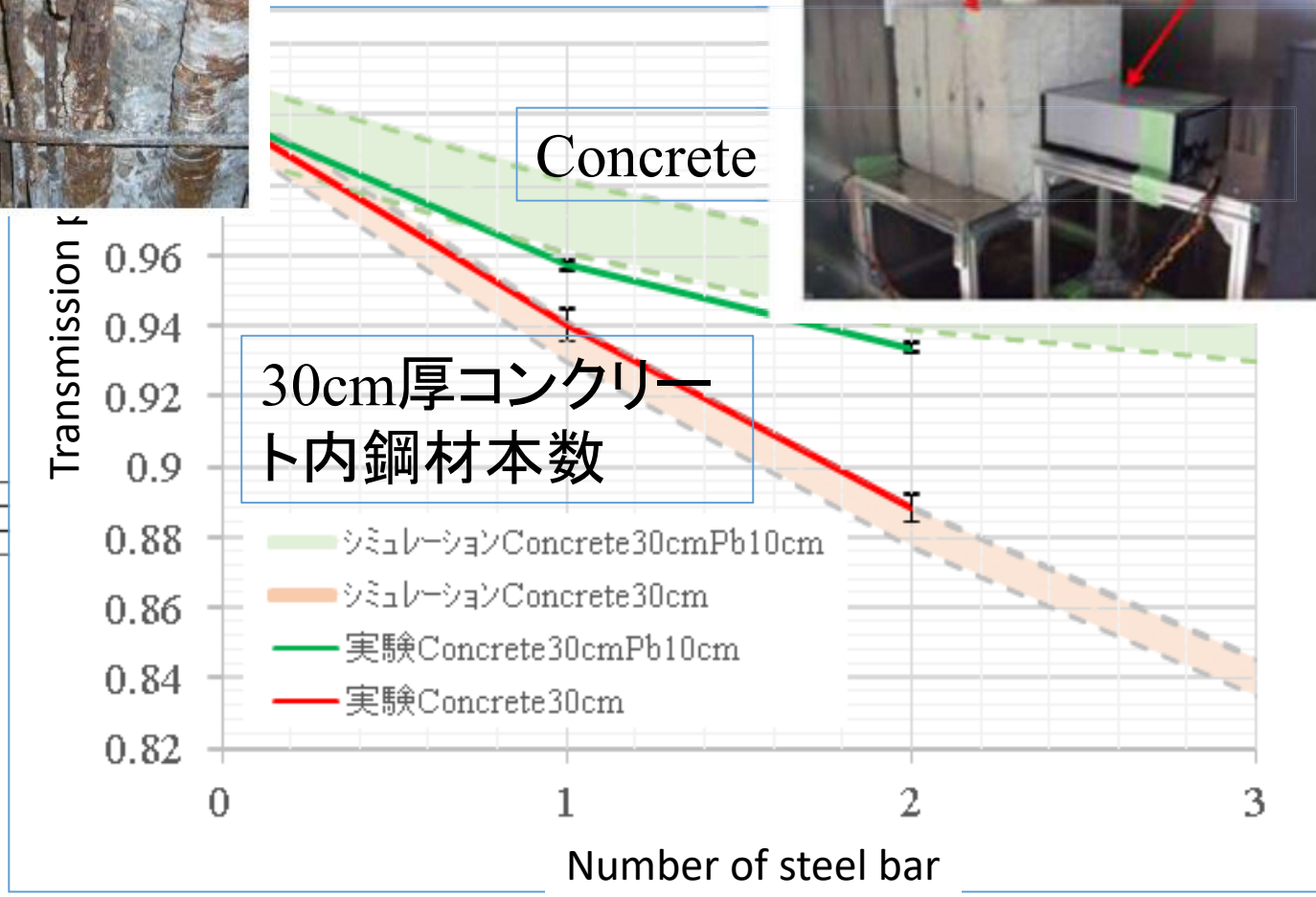
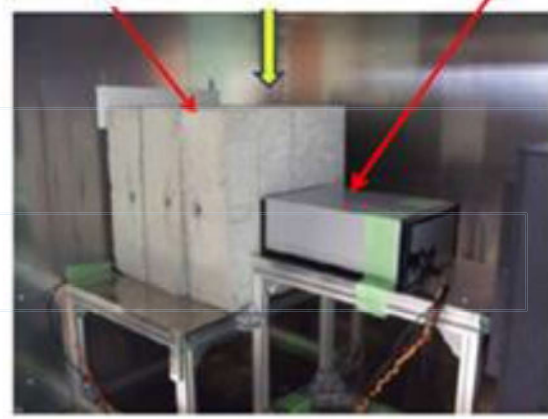
30cmコンクリート内鋼材の本数見分け



Insert into concrete
0, 1, 2, 3



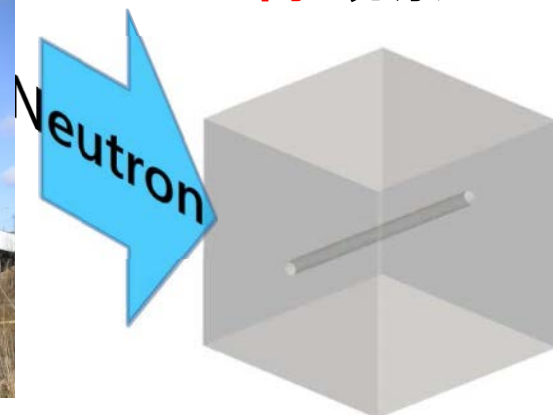
Hole $\Phi 18\text{mm}$ Steel bars 3 ch. detector



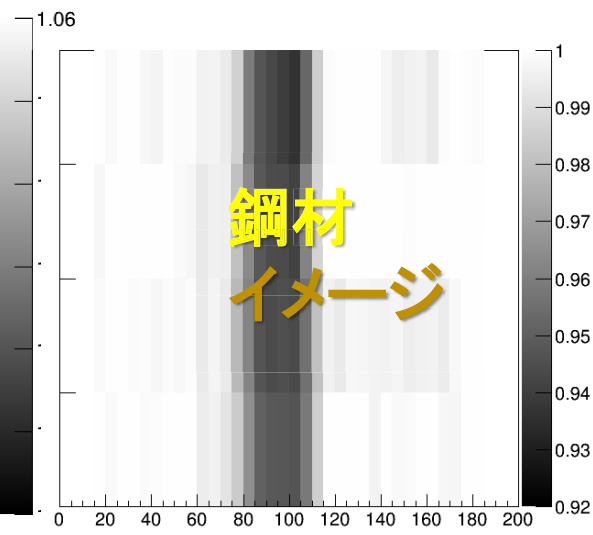
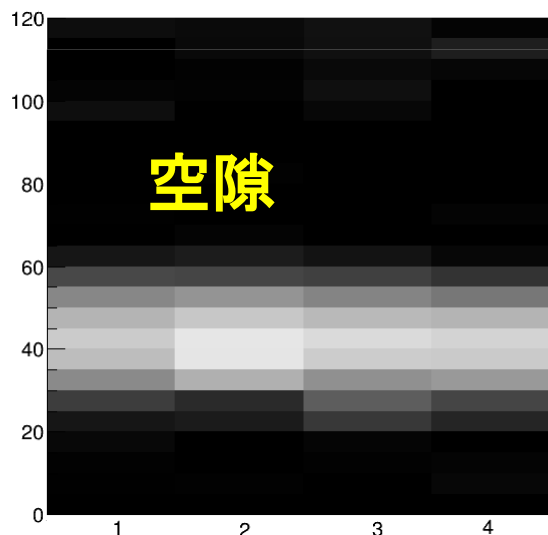
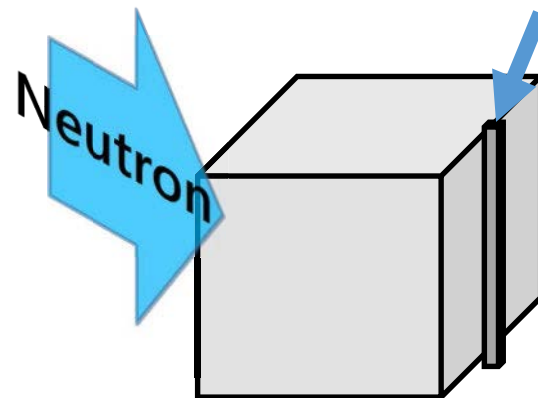
30cm コンクリート内部空隙・鋼材可視化



空隙観察



鋼材観察



Proton linac

Proton energy: 7 MeV
Beam current: 11 μ A (avg.)
Rep. rate: 20 Hz
Pulse width: 100 μ s

塩害の例

妙高大橋 (山間部)

橋梁調査会審議役大石龍太郎様(元土木研究所理事)より



- ・凍結防止剤 ---- NaCl or CaCl_2
- ・海風 ----- NaCl
- ・塩化物イオン(Cl^-) がコンクリート構造物内の“鉄鋼の腐食”を促進
- ・腐食は塩分がある値($1\sim 2 \text{ kg/m}^3$)を超えると始まるとされている。
 (“コンクリート構造物標準示方書”より)

↓ 塩害が進むと...

とある沿岸の栈橋下面

提供:(株)中研コンサルタント



落橋 in USA



事故を未然に防ぎたい!!

Reference : Pittsburg Post-Gazette

28

中性子誘導即発γ線による元素検出の感度

Sensitivity of each element for PGNAA^[1]

H																He					
Li	Be	見つけやすい														B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	Ac																			

高感度 <0.01 mg
 良感度 0.01~1mg
 中感度 1~100mg
 低感度または測定不可



Corrosion of steel bars causes spalling of concrete
 Example of **Port structure**

Target element : **Cl**

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U											

Deterioration of concrete structure has been drawing a greater social attention and severe chloride damage has been observed.



Example of sample : Rice

Target element : Cd, Hg, etc



Gold coin

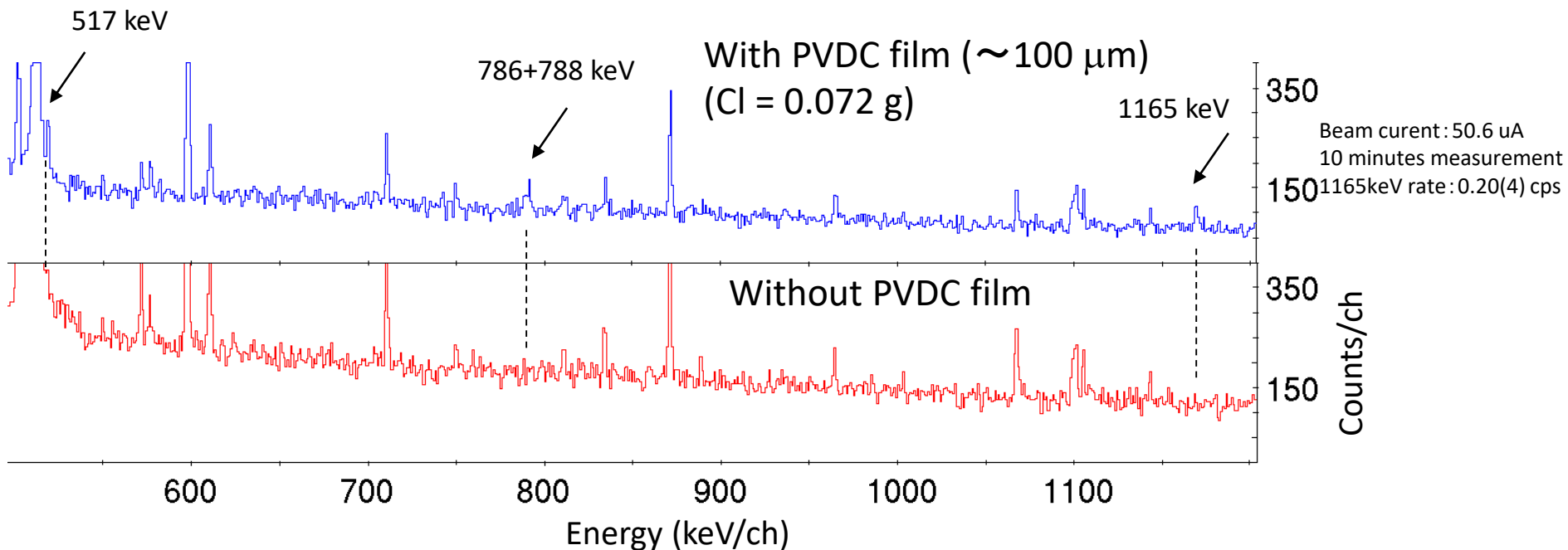
PVDCフィルムのガンマ線スペクトル



小型中性子源RANSは
即発 γ 解析が可能かどうか？

微量(72mg)の塩素(Cl)検出

ラップ8枚(11~12 μm /枚)



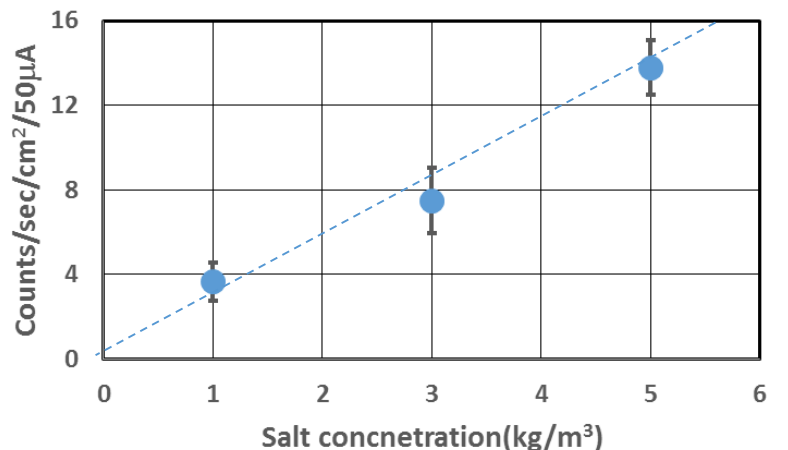
$^{35}\text{Cl} + n$ (Neutron capture reaction)

$\rightarrow ^{36}\text{Cl}^*$ (γ ray emission : mainly 517, 786, 788, 1165 keV)

RANSにおける塩分濃度の感度のPreliminary result

モルタル試料 (40x40mm t=40mm, 1, 3, 5 kg/m³)のスペクトルから得た 517 keV を用いた結果。

観測した結果と定量の塩分との比較。



Values of X axis is salt concentration
in mortar sample

Values of Y axis are calculated by
“(A / ε_γ / I_γ) / t / S / I_p”

A : Peak area of 517 keV (counts)

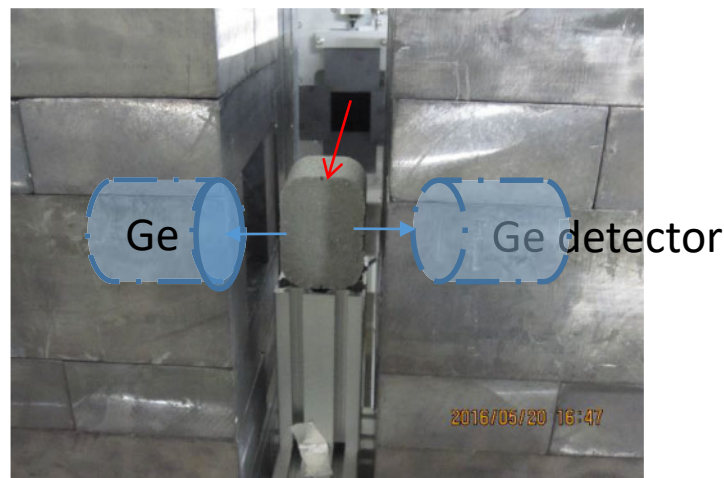
ε_γ : γ ray detection efficiency (%)

I_γ : γ ray intensity ratio (%)

t : Measurement time (sec)

S : Neutron irradiation area on sample (cm²)

I_p : Beam current normalized to be 50 µA

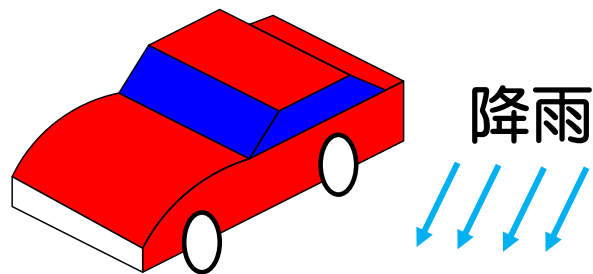


塩分濃度 1 kg/m³ or それ以下が観測可能。

※1 kg/m³ は、腐食が始まる値
“コンクリート構造物標準示方書より”
(値はコンクリートの水セメント比に依存する)

床版の劣化の進行

- 床版は車両走行による疲労の影響を受ける



水の浸入による劣化促進

- コンクリートの圧縮疲労強度は水の影響を受けて著しく低下する

ひどくなる前に劣化箇所を見つけない！

舗装

コンクリート床版

舗装の下で劣化が進行

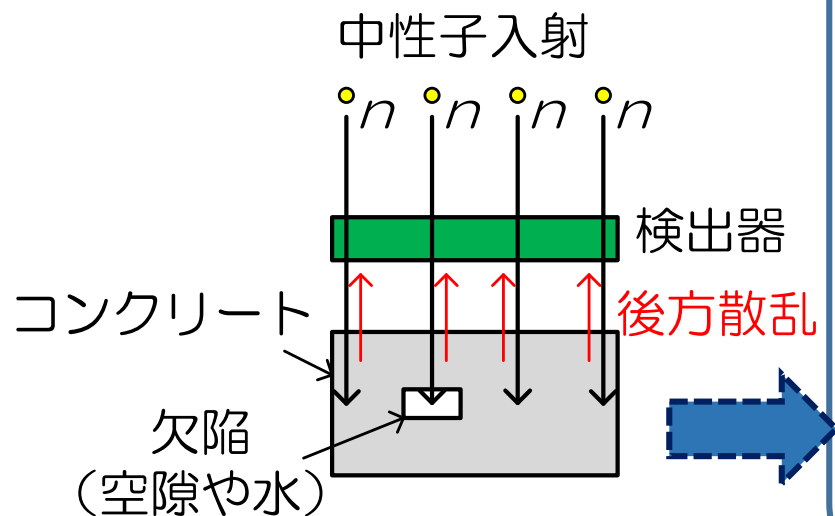
見えない舗装の下を見たい！

- 見えない劣化が進行すると・・・

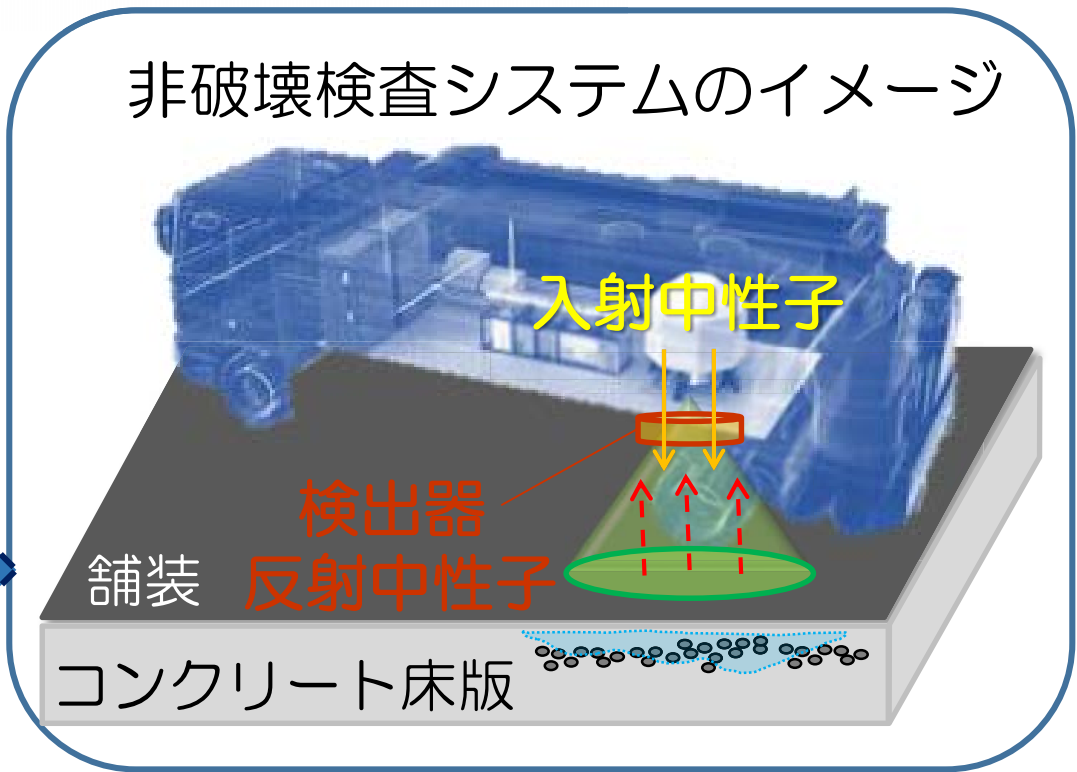


舗装の下を見たい！

反射測定法の開発

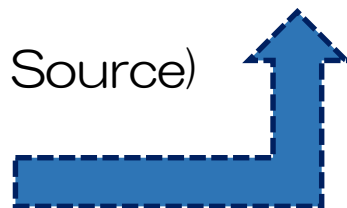


非破壊検査システムのイメージ



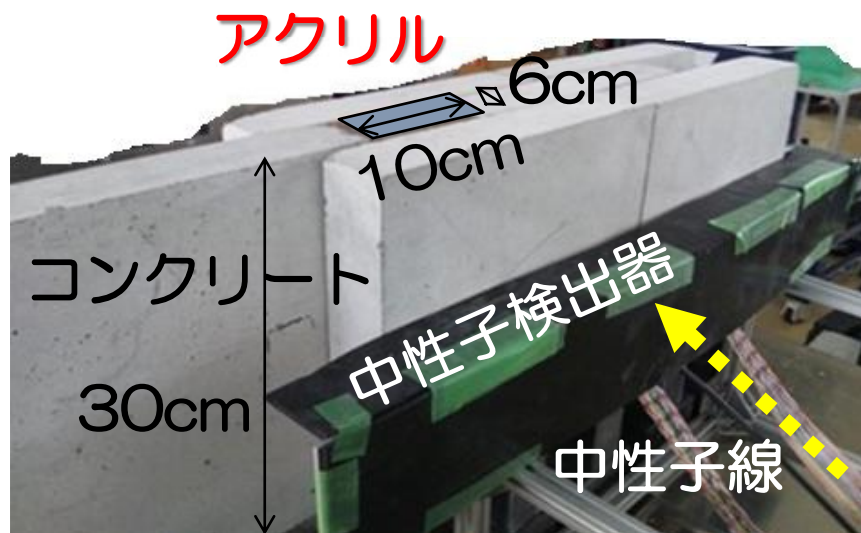
小型中性子源の開発

(RANS : Riken Accelerator-driven Neutron Source)



さらなる小型化、
可搬型へ

床版の劣化を想定した中性子反射実験



6cm厚コンクリートの下に
幅10×深さ6cmの劣化した
箇所があると想定



中性子の量は**増加**

コンクリートが詰まっている
ときより・・・

中性子の量は**減少**



適切な計測タイミングを設定し、
中性子線強度の比較をすること
でコンクリート内部の水や空隙
の位置を検知できる

コンクリート試供体を用いた実験 反射中性子線(後方散乱) 飛行時間法 イメージング

高速中性子(100keV~*MeV)を入射

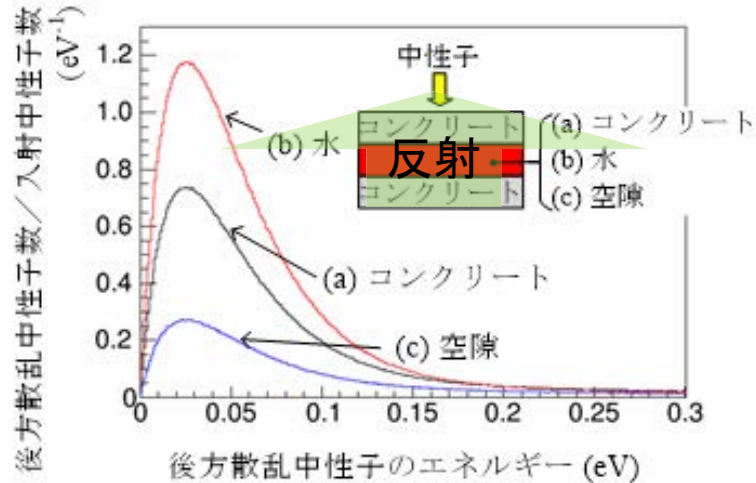


図-2 後方散乱中性子のエネルギースペクトル

高速中性子(100keV~*MeV)を入射
 →入射後、0.1ミリ秒-1ミリ秒の間の時間を選んで、低エネルギー中性子イメージング検出器をON
 →水
 →空隙
 存在を見分けられる

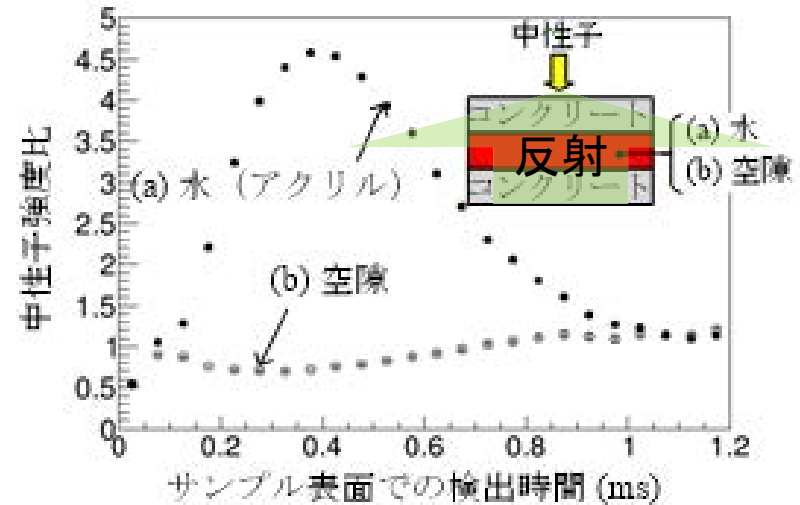


図-6 表面から放射する後方散乱中性子強度を標準状態で規格化した強度比の時間分布

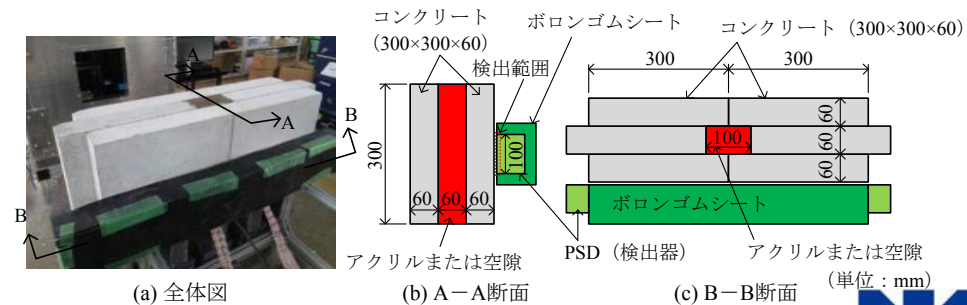


図-5 実験セットアップ

道路破壊せずいたみ具合調査 理研が新技術

ツイートする

シェアする

2016年11月2日 01:32

©CNN

RANSでの実験
サンプルごとの反射量の比較

計数タイミンゲ=0.31 - 0.62 ms

放射線中性子透過計はコンクリートを通りしとき

Normalized count count/sec

Sample space 100mm

空気 100mm 規格化基準

neutron

コンクリート

コンクリートのみ

ホタンク 75-80mm

アクリル 100mm

アクリルと水は見え方が近い 水素密度が同等なため

空腔があるとき 中性子量は減少する

アクリルや水があるとき 中性子量は増加する

sample type

理化学研究所・大竹淑恵チーム

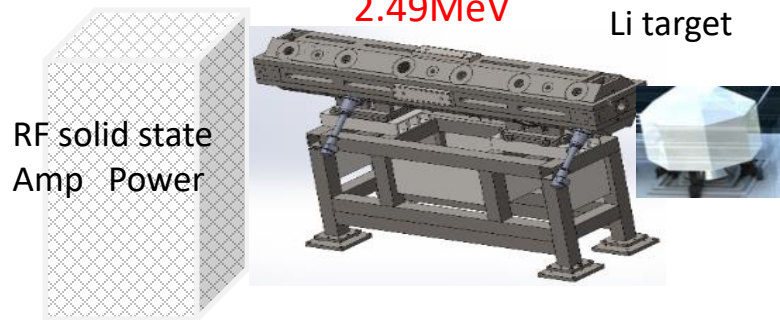
▶ 滑走路や道路内部のいたみ具合を破壊せずに調査する新技術を開発

要約

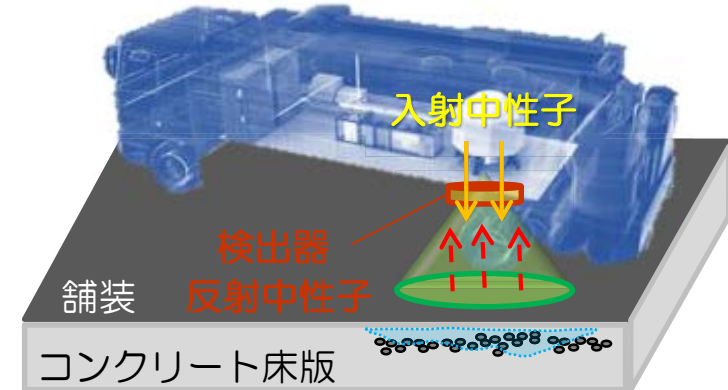
実用化へ向けて: RANS2開発 開始

compact neutron system in 5ton truck

非破壊検査システムのイメージ



2017: 2.49MeV accelerator assemble,
2018;neutron beam



可搬の非破壊検査システムイメージ
(現在の未来図)

反対車線は $0.1\mu\text{Sv/h}$ 未満の放射線量
by GEANT4 simulation.



- 放射線障害等防止法第10条 および 関連規定(平成17年7月改定) **Japanese regulation 4MeV>linac**
 - 橋梁等の非破壊検査に用いる **直線加速器で4メガ電子ボルト**以上のエネルギーを有する放射線が発生しないものは、放射線発生装置の使用の場所の変更を都度許可を得る必要がなく届出で足りることとする。(ただし、設備については、事前に原子力規制委員会原子力規制庁の届け出許可が必要。)
 - 実行線量: (3か月で1.3mSv)
 - 労働安全衛生法令による管理区域
 - 人事院規則による管理区域

インフラ非破壊

- 要求
- 空港滑走路
- トンネル？

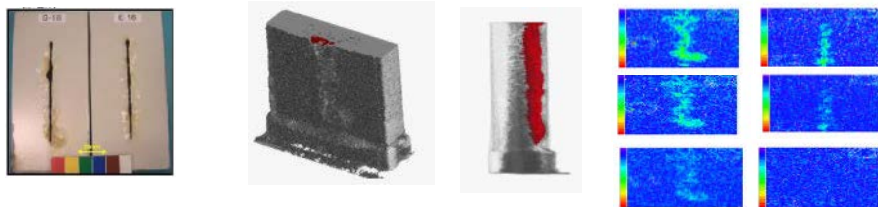
12月26日
片掛トンネル
富山県(JR西日本)



まとめ：社会に貢献する中性子源RANS

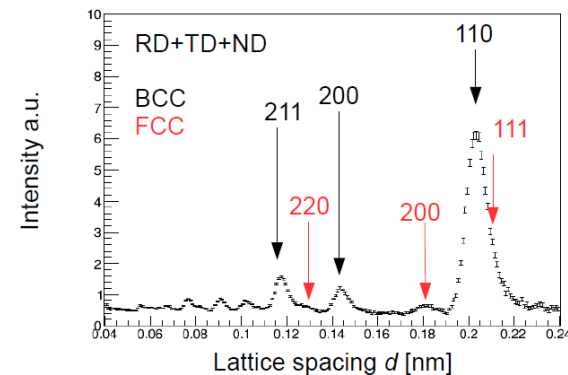
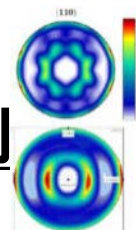
低エネルギー中性子

1. イメージング 腐食可視化

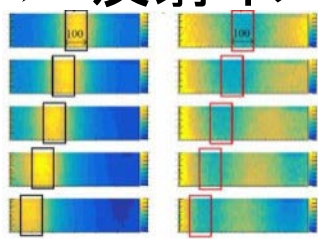


2. 中性子回折集合組織変化、 複相：オーステナイト約2%以内で計測

残留応力計測、双晶変形

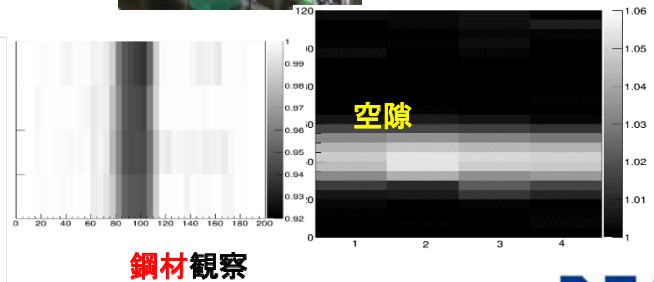
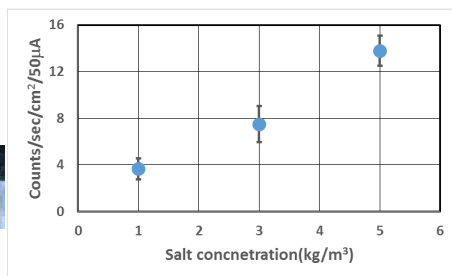


- 高速中性子線
- インフラ非破壊観察
- 非破元素分析(NPGAA塩分)
- 反射イメージング



RANS2
2.49MeV

RF solid state
Amp
Power



Neutron beam technology team 2016 October

