

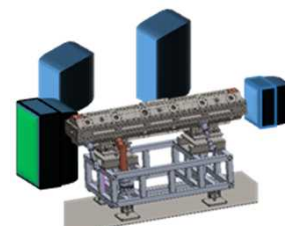
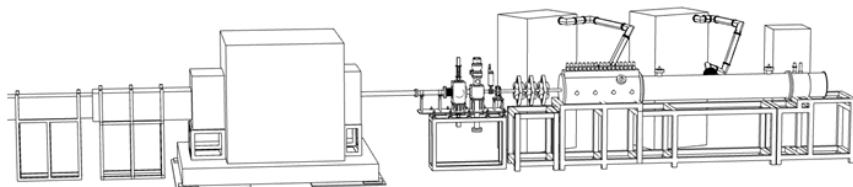


理研小型中性子源システムRANS プロジェクト

Accelerator-based Compact Neutron Source RANS and its application to Non-destructive Inspection

2019年12月24日 量子ビーム利用推進小委員会

-RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source-



大竹淑恵 Yoshie OTAKE yotake@riken.jp

理化学研究所 光量子工学研究センター (RAP)
中性子ビーム技術開発チーム

竹谷篤、須長秀行、高村正人、小林知洋、若林泰生、高梨宇宙、水田真紀、藤田訓裕、岩本ちひろ、池田翔太、Yan Mingfei、橋口孝夫、森本秀夫、見原俊介、後藤誠、松崎義夫、箸蔵晴彦、Ma Baolong
池田裕二郎(RAP 特別顧問)



いつでも、どこでも中性子
理研小型中性子源RANS
役に立ち・使える・中性子システム
線源と検出技術は表裏一体

何のための小型中性子源か？ ニーズに応える

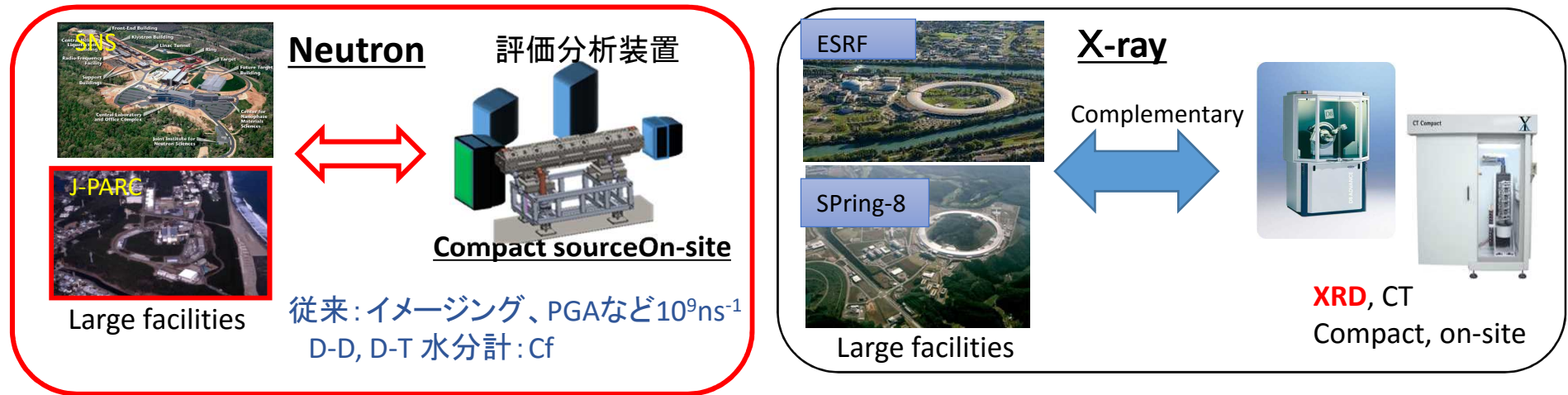
必要な場所で使える普及型システム開発

中性子源
開発・高度化



計測技術・
評価分析技術

ものづくり現場ニーズ 現場で非破壊分析 企業、公設試験所で使う中性子評価分析装置



- ・大型施設: TOP Science + 産業利用
- ・小型システム: 現場で普段使い: 現場ニーズ: 材料開発 ex. 軽量材料 高張力鋼板

RANS小型での評価分析を明示: イメージングだけではない。

分析評価装置 ⇒ 金属組織、ポリマー内部、サブナノ領域評価～

- ・安全かつ手軽に現場利用可能な小型中性子源システム
- ・屋外でも利用可能な可搬型中性子源・可視化分析技術

→ 実用化へむけたシステムとしての研究開発。

RANSプロジェクト
安全、普段使い

社会インフラ ニーズ：壊さず（傷めず）観察・経年観察 維持管理メンテナンス：**予防保全**

塩害による崩落事故 腐食劣化

イタリア・ジェノバ近郊 モランディ橋崩落事故（2018.8.14）



アメリカI-70 コンクリート跨道橋の崩壊



出典：Pittsburg Post-Gazette

2005年12月、建設後45年経過したペンシルバニア州の州際道路上の跨道橋が崩壊。凍結防止の塩分散布の影響によるコンクリート桁の鉄筋腐食が原因。

初期施工不良、劣化による事故

カナダ デラコンコルド跨道橋の崩壊



2006年9月、建設後35年経過したモンリオール市郊外の高速19号上の跨道橋が崩壊。ゲルバー形式桁受部の不適切な配筋、防水処理の不足、スラブのせん断補強鉄筋の不足等が原因。

出典：落橋に関する委員会報告書

Banthia氏から日本の技術者の方々へ

カナダと日本の構造物診断のための技術は、残念ながら、まだ極めて低いレベルのままである。X線、電磁波、弾性波、電磁誘導を用いた方法を含む先端診断技術を確認し、コンクリート構造物へ適用するために、一層の研究が必要である。

出典：六郷ら、カナダのデラコンコルド跨道橋の崩落事故に学ぶ、コンクリート工学,2008.12

急速に社会基盤整備が進むアジア諸国 初期施工補償への応用



香港 ストーンカッターズ橋

出典：日本建設業団体連合会HP



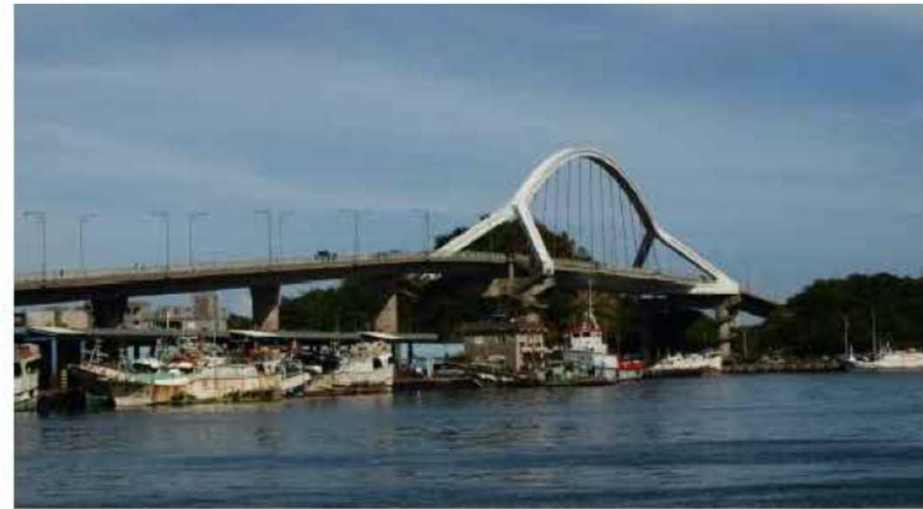
ベトナム ビン橋

一部資料：大石龍太郎様(元土木研究所理事 オリエンタル白石)より



2019年落橋事故 : Bridge Collapse in Taiwan 1 October 2019

TAIWAN 台湾 南方澳 (Nanfangao)



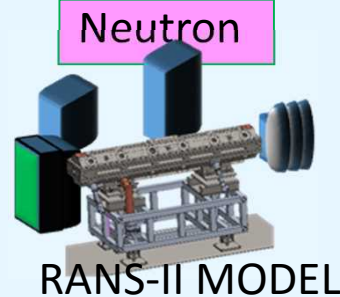
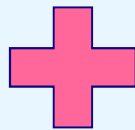
Data of 2nd Oct.
The dead 5
Disappearance 1
The injured 12

写真 : <https://udn.com/news/story/7321/4078135>

理研RANSが目指す 現場評価分析装置 現場で活躍する中性子計測システム

現場 非破壊検査(評価分析)
据置型 Floor-standing type

X-ray, X線、電子線とともに活躍する中性子
Electron SEM, TEM



現在ニーズの50%が
X線で観察できない

屋外現場 壊さずその場で観察
可搬型 Transportable type



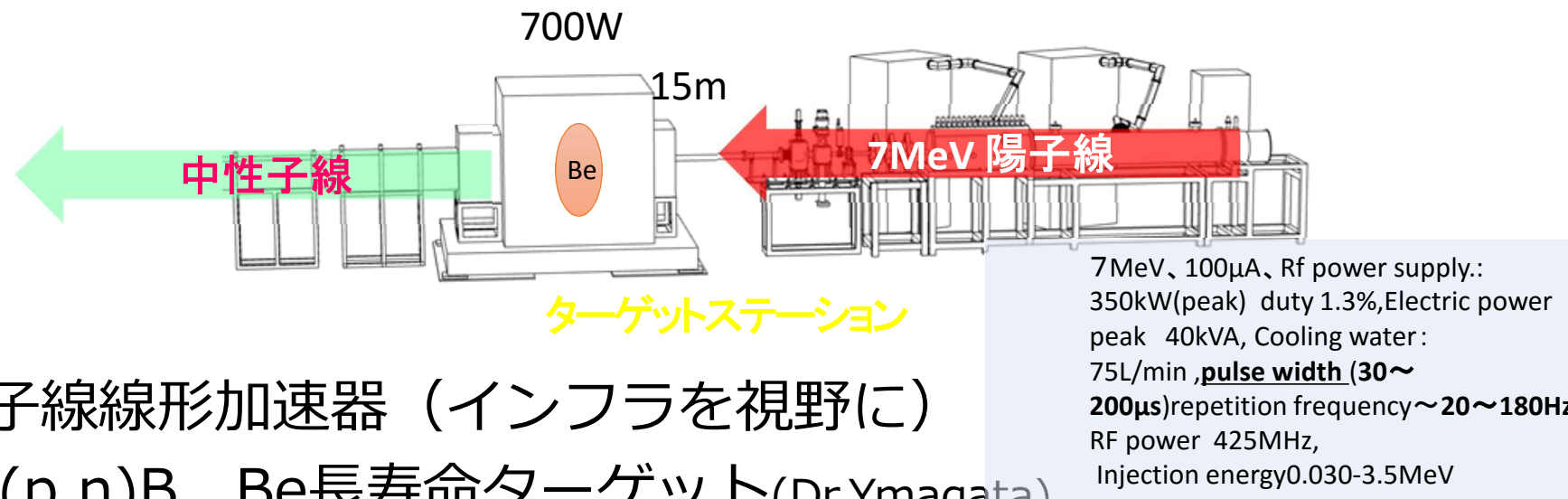
Transmission
imaging

Observation from the surface
Salt concentration,
Visualization of degradation floor slab

1. 日常利用可能な中性子源システムの実現
 1. 安全稼働(低放射線環境、安全性確保)
 2. 容易な運転
2. 定量評価分析可能 Good S/N measurements for quantitative analysis
(No powerful source, but proper)
3. メンテナンス・廃棄も考慮 As few as possible of activation products

理研の小型パルス中性子源システム RANS

RANS-RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source-700W 2013年1月 発生



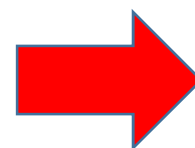
- 陽子線線形加速器 (インフラを視野に)
- Be(p,n)B Be長寿命ターゲット(Dr.Ymagata)

- **7MeV**

- **100μA** 平均最高電流

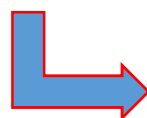
- **10μs-180μs** パルス幅

- **20-180 Hz** 繰り返し周波数 (小型は高繰り返し可能)

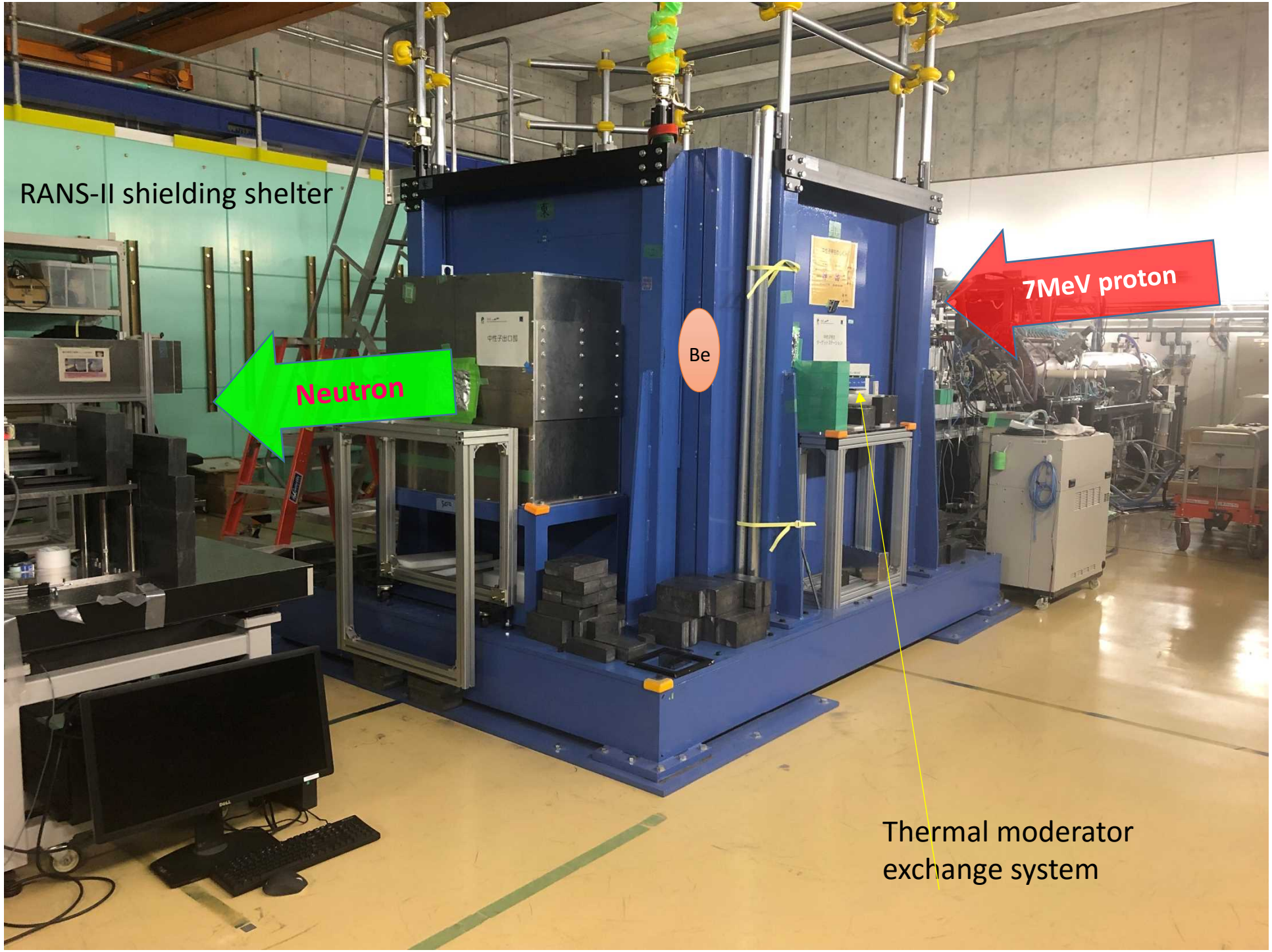


発生中性子数

10^{12} s^{-1} @ Be



短pulse-> 中性子回折による金属組織観察(残留応力へ): 高分解能
長 pulse -> イメージング, 小角散乱



RANS-II shielding shelter

Neutron

Be

7MeV proton

Thermal moderator exchange system

RANS RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source

世界初:減速材交換可能 中性子源システム

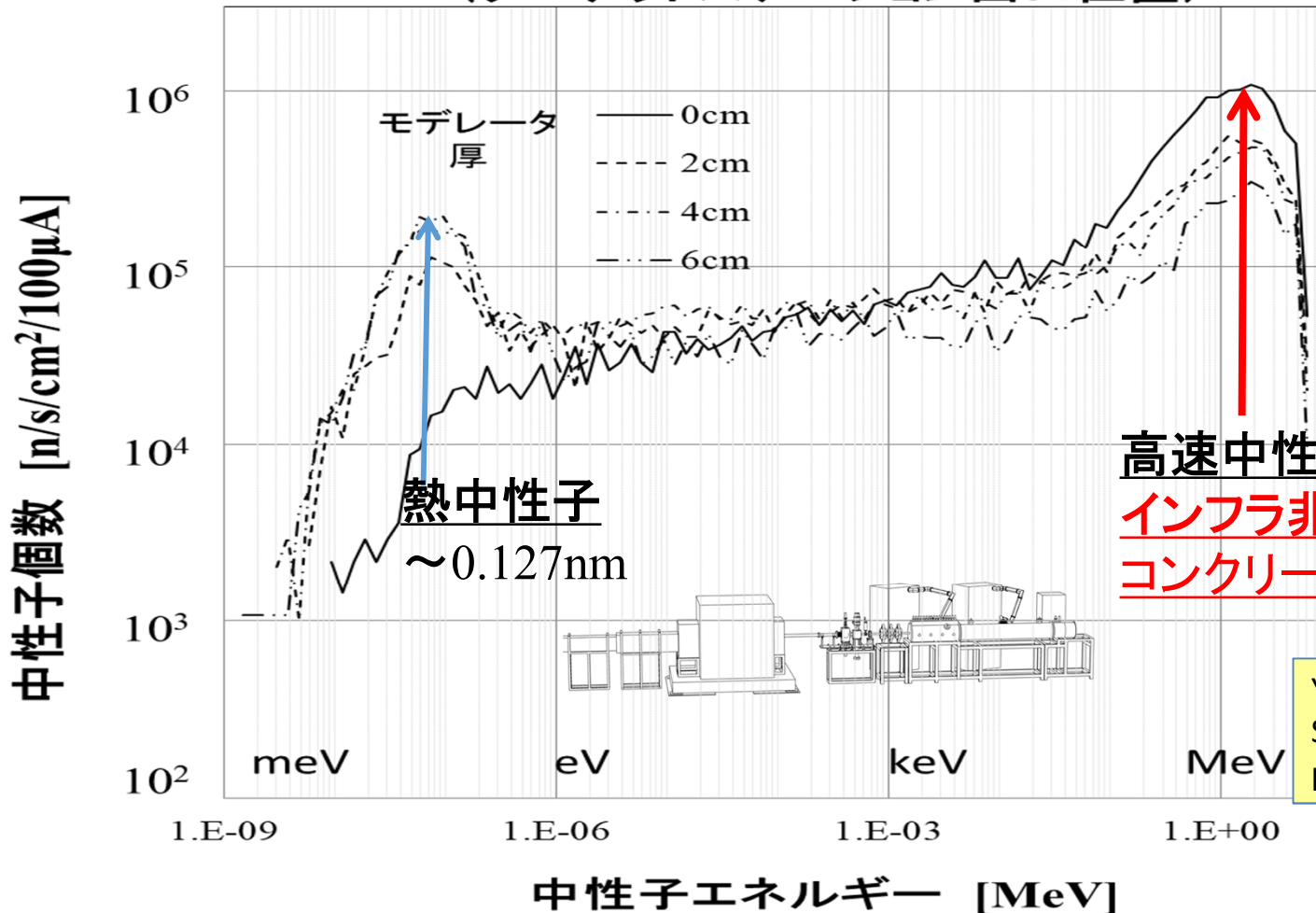
減速材

熱中性子 PE6,4,2 cm 非結合、結合型

冷中性子 メシチレン(高度化中)



RANS中性子線エネルギー分布
(ターゲットステーション出口位置)



高速中性子
インフラ非破壊評価
コンクリート内部非破壊観察

Y. Wakabayashi et al J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 55 (2018) pp.859-867



理研小型中性子源システム RANS 中性子線による非破壊観察、評価分析：



1. イメージング実験 : 内部非破壊観察 : cm, mm, サブmm
2. 回折計 : 内部組織観察、変化観察 : サブナノ構造 (結晶構造)
3. 即発ガンマ線分析 元素分析 : 内部元素検出 : 定量評価 (kg/m³など)
4. 速中性子透過イメージング : 分厚いサンプル内部 (60cm厚等)
5. 速中性子反射イメージング : 表から内部を観察 (20cm下、cm)
6. ・小角散乱装置 (茨大、小泉教授) SANS will come with Ibaraki : ナノ、サブミクロン構造
7. ・位相イメージング装置 開発 (東北大 百生教授)

★高輝度化 : 含冷中性子源高度化 (メシチレン)

大型—小型の連携の具体例

⇒J-PARCセンターとの協力により高輝度冷中性子源を開発

ものづくり現場で小型中性子源利用： 材料開発や非破壊検査：RANS回折計

日本鉄鋼協会：「小型中性子源による鉄鋼解析研究会」

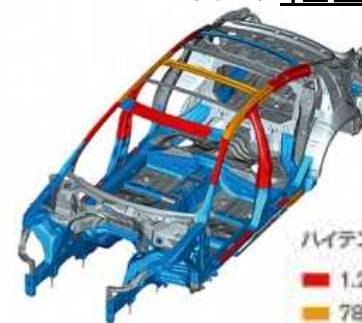
共同研究 JAEA:鈴木、都市大:熊谷

板材	引張強さ	比重	比強度	コスト(1kg当り)	生産量
超高張力鋼板	980~1470MPa	7.8	126~188MPa	100円程度	鉄:12億ton
従来高張力鋼板	490~790MPa	7.8	63~101MPa		
軟鋼板 SPCC	340MPa	7.8	44MPa		
アルミ合金板 A6061(T6処理)	310MPa	2.7	115MPa	500円~600円	アルミ:3400万ton
マグネシウム合金板 AZ31	270MPa	1.8	137MPa	3000円程度	マグネ:60万ton
PAN系炭素繊維	2000MPa~5000MPa	1.6		2000円程度	炭素繊維:2万ton

豊橋技術科学大学 森謙一郎 <http://plast.me.tut.ac.jp/>
 矢野経済研究所 <http://www.yano.co.jp/press/pdf/1302.pdf>

●高張力鋼板の適用拡大中

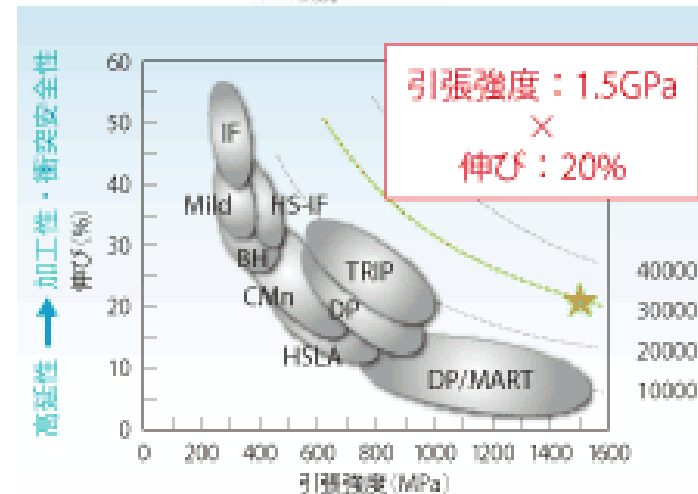
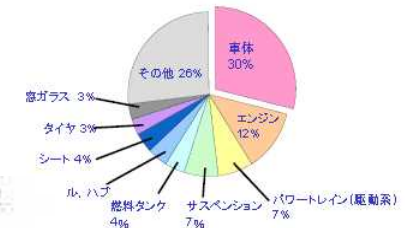
- 高強度比と低価格の両立ができる
- 10%の軽量化が燃費を10%良くする



日産自動車HP

ハイテン材の使用部位

- 1.2GPa
- 780 ~ 980MPa + HS
- 440 ~ 590MPa
- 軟鋼



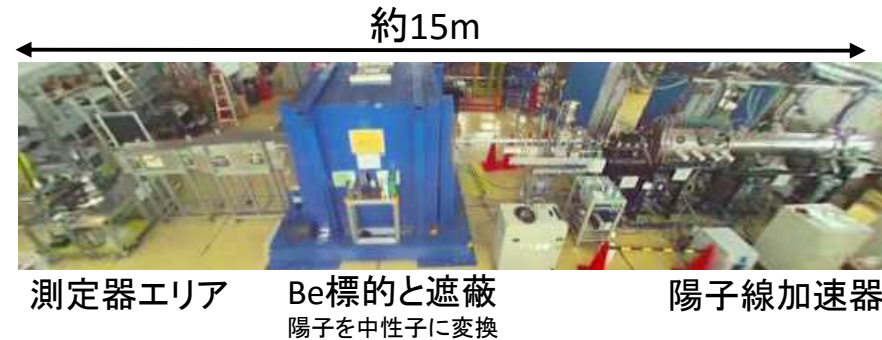
ISMA HPより



RANS: 小型の強みを生かした 回折による鉄鋼組織観察



複相鋼サンプル
9mm×10mm×9.5mm



小型線源を活かすセットアップ

- ビーム強度を最大限使う近距離照射
- 高S/N: 遮蔽の配置
- 高分解能要求に応える: 減速材の開発
- サンプル距離のチョイス

鉄鋼協会作製の標準サンプル

- フェライト+オーステナイト
- 大型装置での測定実績あり。

集合組織観察 : comparison with J-PARC (iMATERIA)



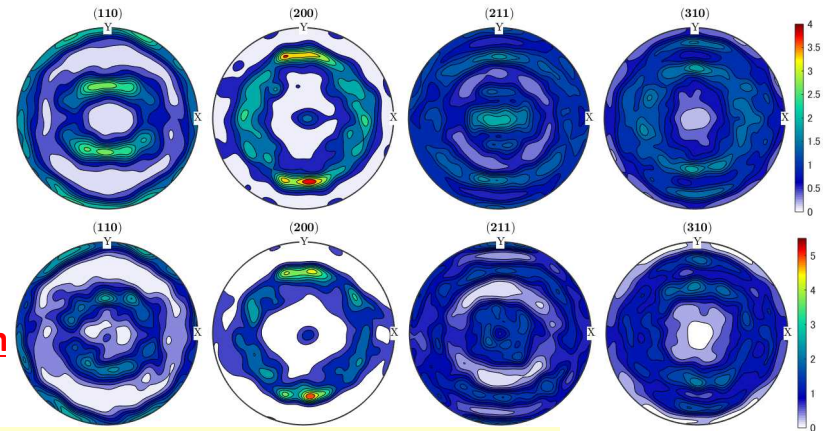
Texture evolution evaluation pole figure : IF steel



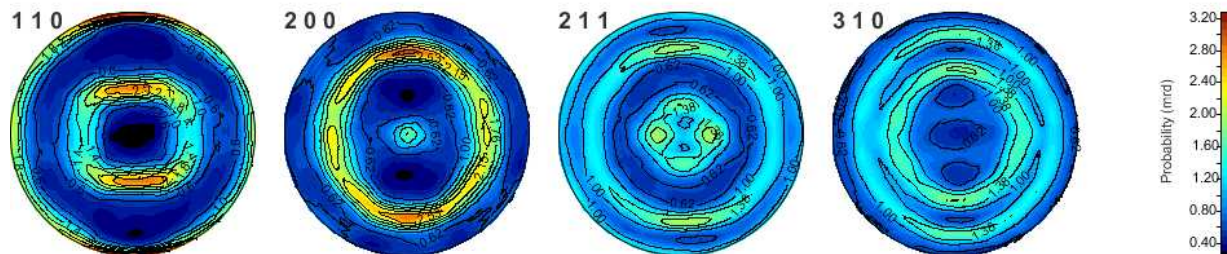
Φ10mm
h=10mm

As received
5min 60 angles

10% compression
2 min 60 angles



RANS計測結果 (detector 16 segmentation) x60 times rotation: MAUD (ODF resolution=5°)

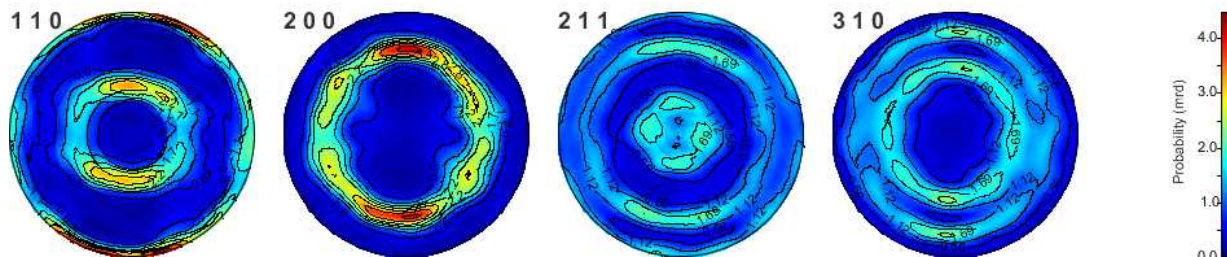


われ

スプリングバック

現場利用→高効率化
無駄を省く
材料設計

Comparison with J-PARC results 同一サンプル **J-PARC計測結果**
iMATERIA (detector 132division x2 rotation MAUD (ODF resolution=5°))



鉄鋼：革新的構造材料開発を現場で行う。精度1%達成

retained austenite evaluation

Institute steel and iron Japan Research Group activity (2014-2016),
Nippon Steel & Sumitomo Metal Co. JFE-Steel, Kobe steel, Daido steel

Controlled
samples produced

9mm×10mm×9.5mm



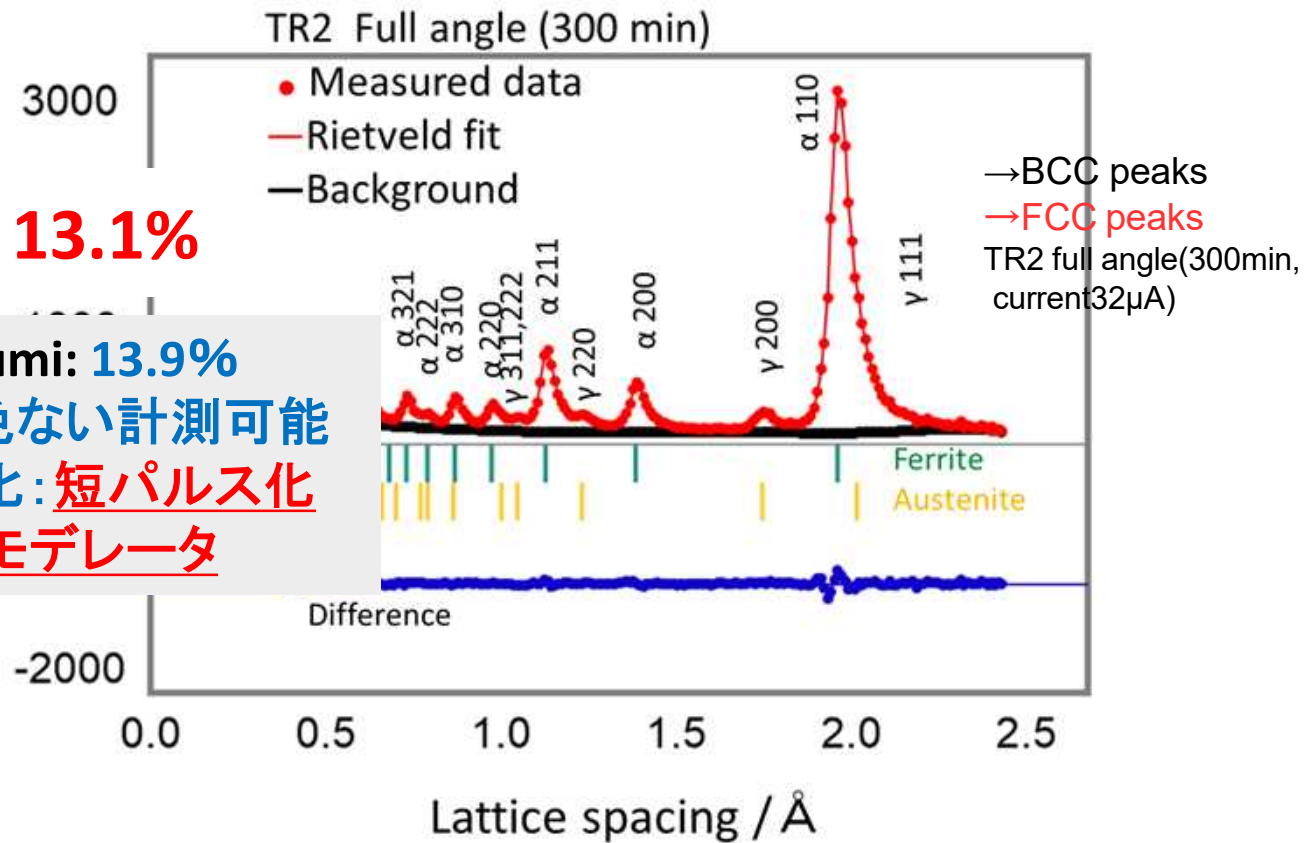
Austenite : 13.1%

J-PARC Takumi: 13.9%

大型施設と遜色ない計測可能
→更なる高度化：短パルス化
非結合型モデレータ

Round
RANS,
XDR, EI

2minutes for 1 diffraction
Volume fraction
estimation:30minutes- 5
hours measurements
according to requested
accuracy

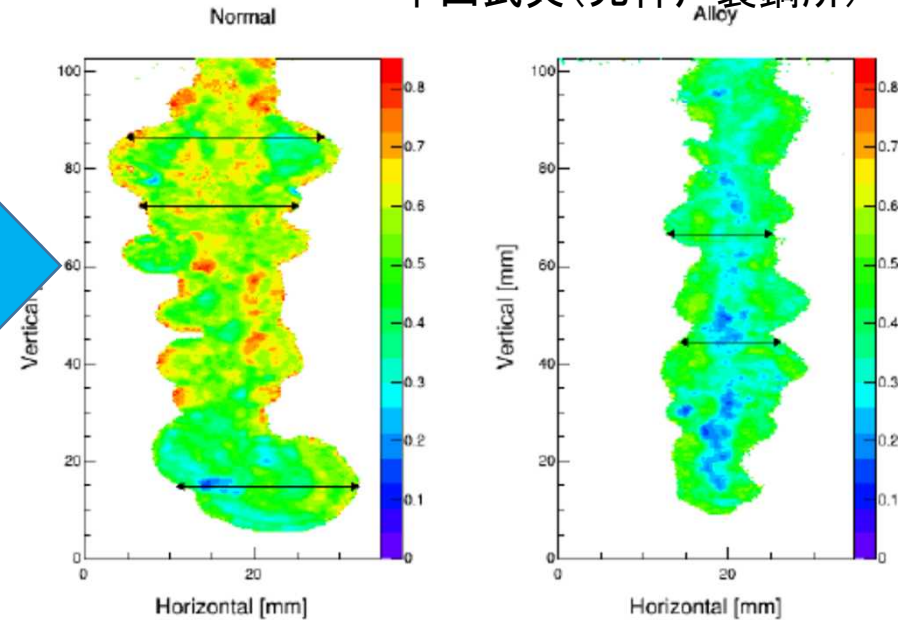
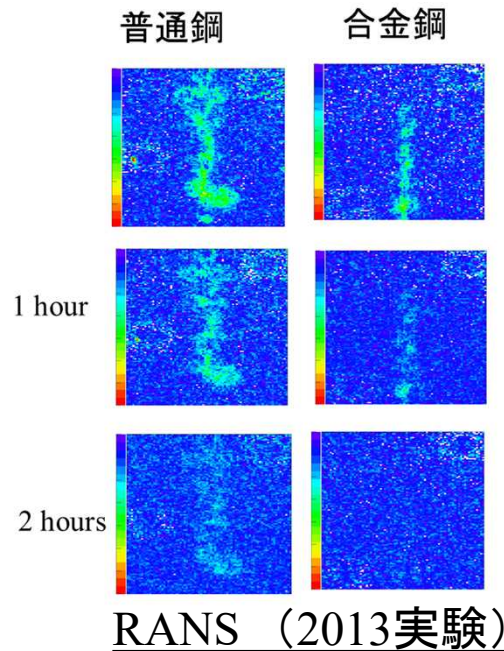


中性子回折が日常的な評価分析手法となる。
計測時間：30分から数時間で材料評価を実施可能

小型→大型→小型連携による技術発展

鉄鋼企業からのニーズ：腐食の可視化、メカニズム解明

竹谷篤、池田裕二郎、大竹淑恵
中山武典(元神戸製鋼所)



RANS (2019トライアル実験へ)

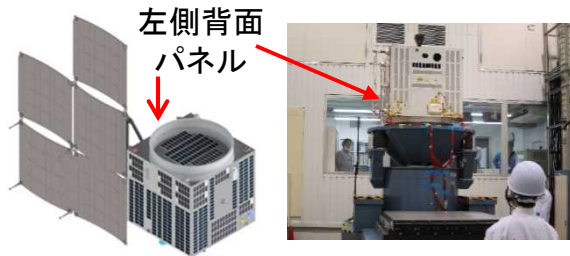
J-PARCBL10 (2016)

-> 小型—大型の連携による中性子イメージング技術の高度化→小型へのフィードバック
→RANSにおいて薄いの水(水素)を検出目指す

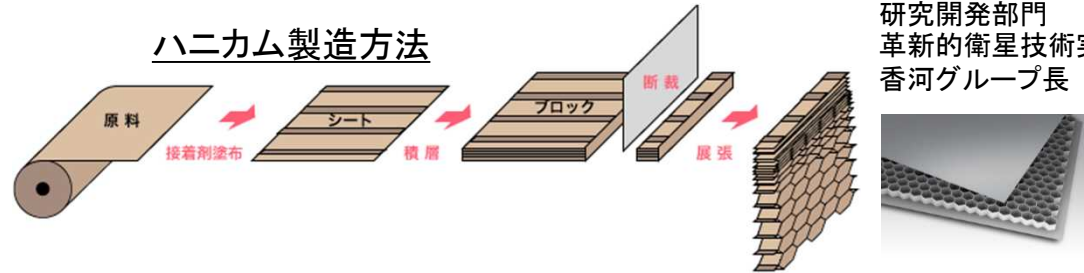


外部ニーズ: RANS人工衛星構造体(アルミハニカム)検査

小型実証衛星1号機
(H30打上げ成功!)



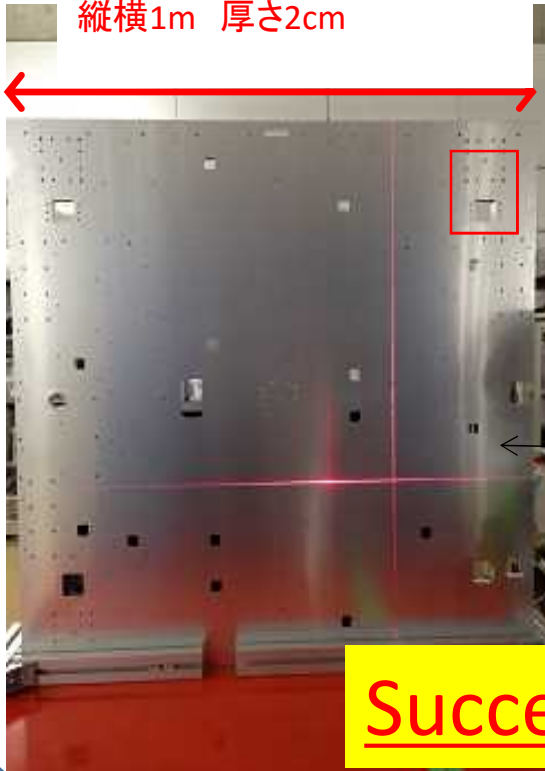
ハニカム製造方法



資料提供
宇宙航空開発研究機構
研究開発部門
革新的衛星技術実証G
香河グループ長

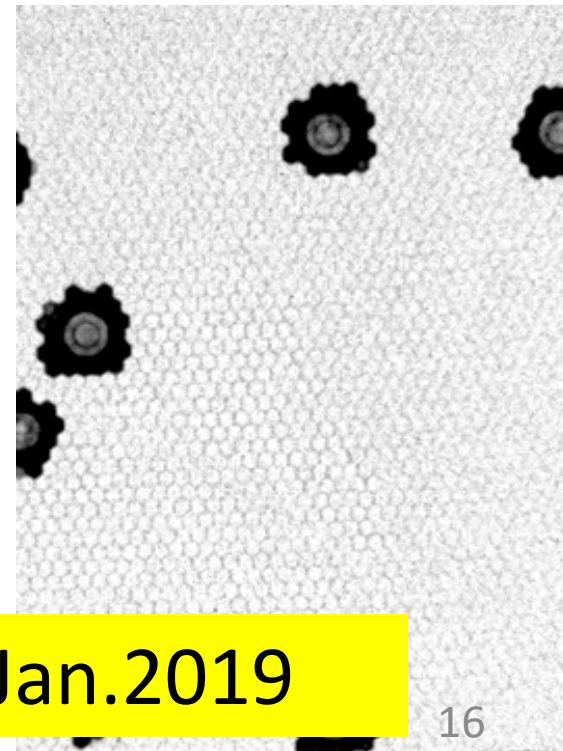
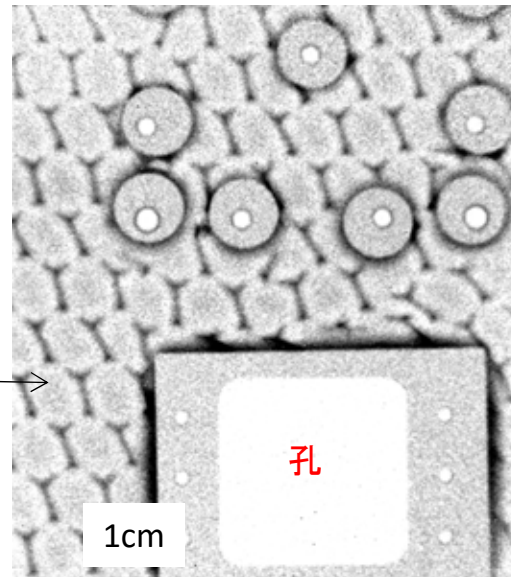
RANS非破壊観察

縦横1m 厚さ2cm



パネル内非破壊観察対象

接着剤 スペース 樹脂 ネジ穴 均一性



Success of launch 18 Jan.2019



RANS: 計測技術 社会インフラ・非破壊健全性診断へ

コンクリート構造物

非破壊可視化: イメージング 透過

後方散乱イメージング(反射)

分析: 即発 γ 線分析(元素分析)

コンクリート内部 塩分評価



コンクリート内損傷の透視

—非破壊—壊さず、表面から内部を観察する—

池田義雅、大竹淑恵、吉村雄一、水田真紀、
藤田訓裕、岩本ちひろ、高梨宇宙

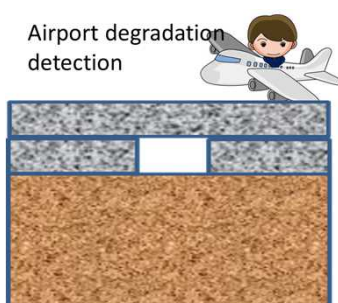
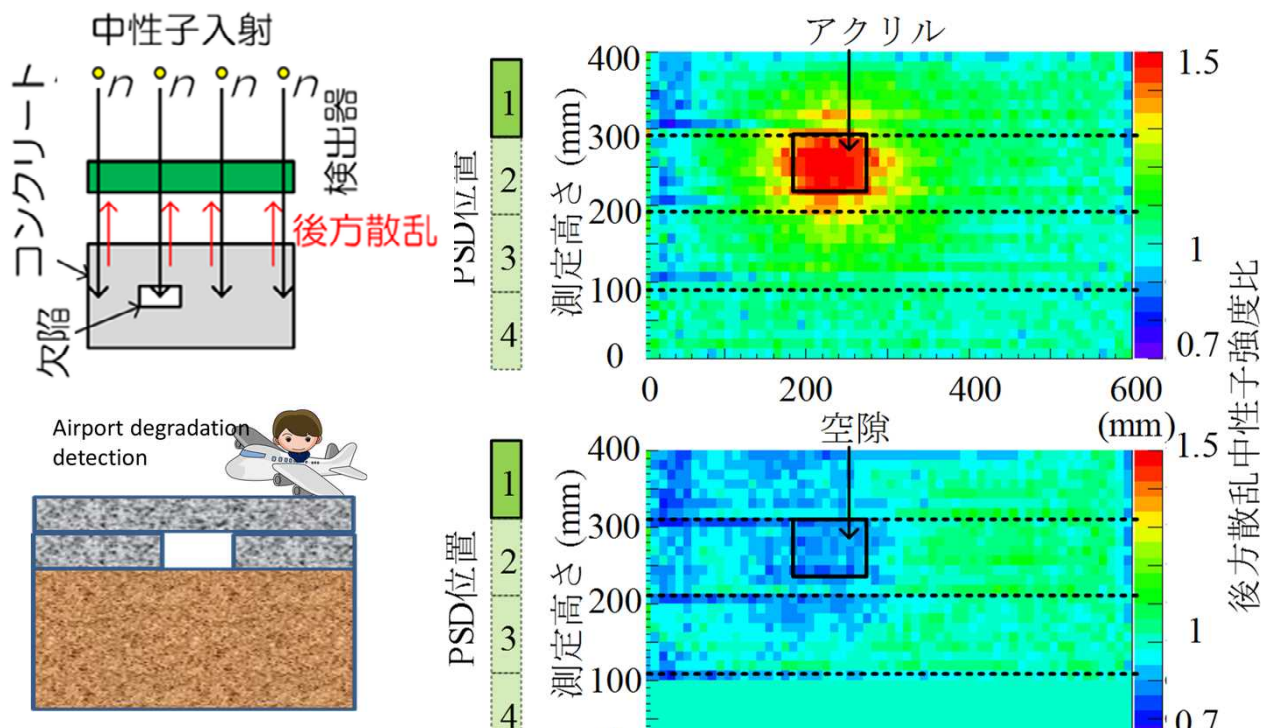


反射中性子によるアスファルト床版劣化可視化

・ 反射中性子測定法の検証

実際の現場に近い損傷 空隙 滞水を表面から可視化

- ・ アスファルト舗装5cm下の欠陥
- ・ 厚さ5cmの欠陥（アクリル、空隙）



高速中性子線をコンクリートに入射し、
TOF+エネルギー変化観察
→ **新計測法** 後方散乱イメージング

Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 15, No. 6, 2013
Conference on Laser Energy Science / Laser and Optics (2017)
欠陥（アクリルや空隙）

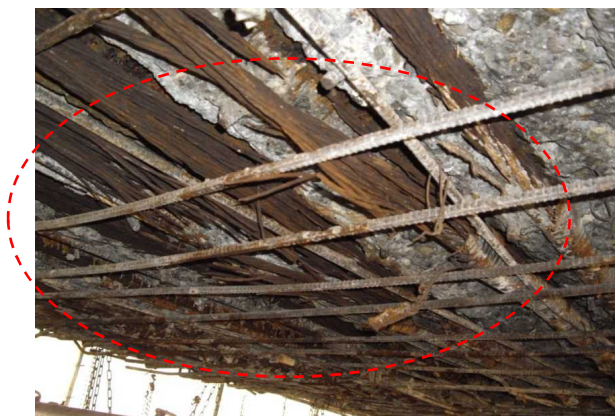
コンクリート内部(深部)塩分分析: 高速中性子

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 CaCl₂
- ・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(1.6 kg/m³)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...

落橋 in USA



事故を未然に防ぎたい!!

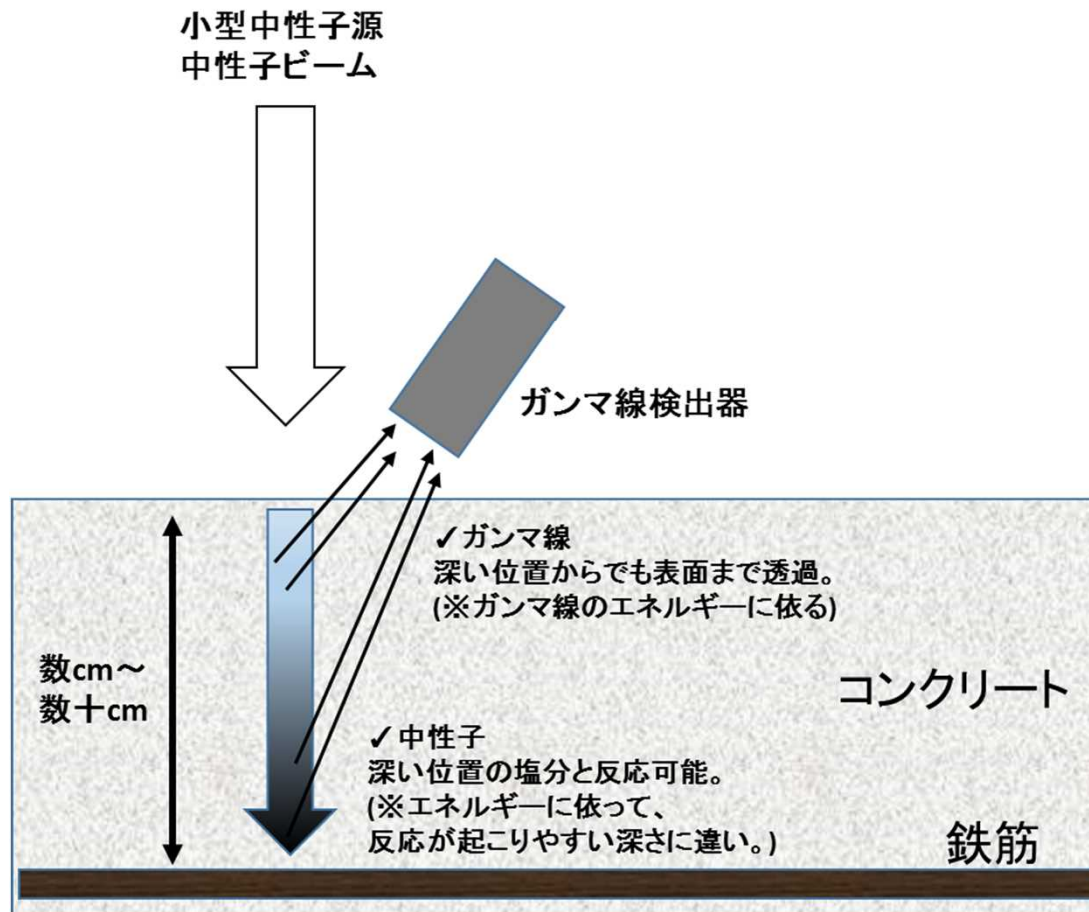
Reference : Pittsburg Post-Gazette



壊さずコンクリート内の塩分計測可能

中性子捕獲即発ガンマ線分析 (NPGA) による

[本研究の提案する手法]
中性子のエネルギーによる
透過度および捕獲反応率の違い、
およびガンマ線の透過性を利用し、
非破壊で塩分濃度分布を測定する。



特徴

- ① 測定前処理不要
(形状, サイズ自由)
- ② 試料の再利用可能
- ③ 多元素の同時計測可能
- ④ 中性子照射中のオンライン測定
- ⑤ ナノグラム の感度
(元素および照射中性子量に依存)

表面近傍の塩分と
コンクリ内部の塩分の関係

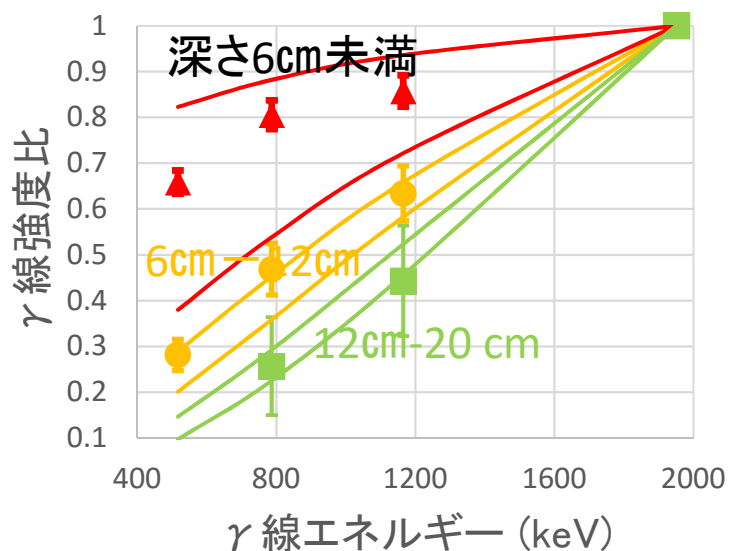
1.塩害による落橋事故を未然に防ぐ技術開発に成功：

塩害箇所：山間部（冬季：凍結防止剤散布）沿岸部など

コンクリート内部の塩分分布を
非破壊計測できる

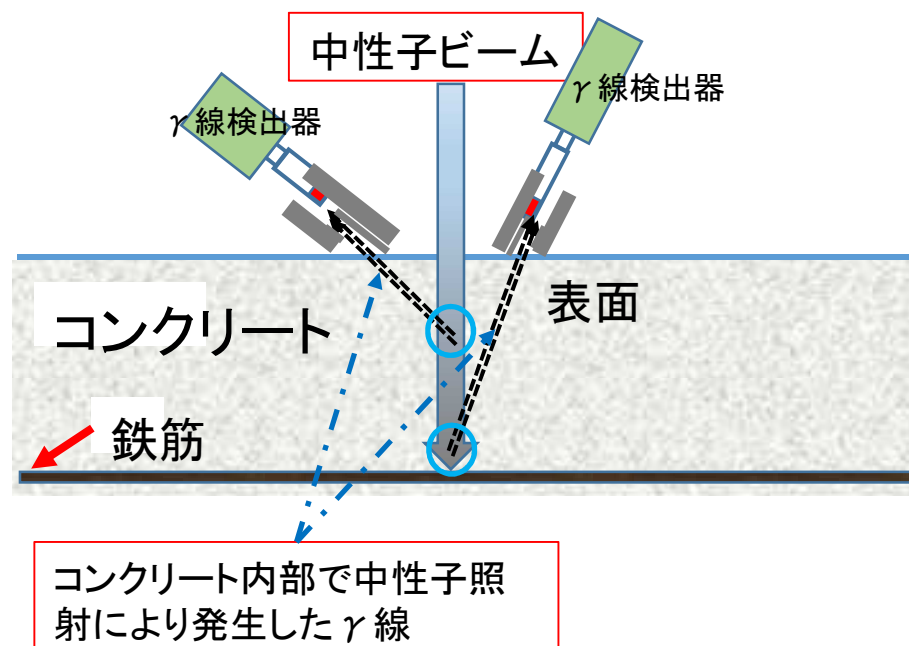
2018年10月25日プレスリリース

即発γ線強度比⇒塩分深さ分布
が得られる



- ▲ 設置場所1の実験値 (表面6cm深さまで)
- 設置場所2の実験値 (深さ6cmから12cmまで)
- 設置場所3の実験値 (検出器1)
- 設置場所1 (0~6cm)の計算値
- 設置場所2 (6~12cm)の計算値
- 設置場所3 (12~18cm)の計算値

屋外適用イメージ



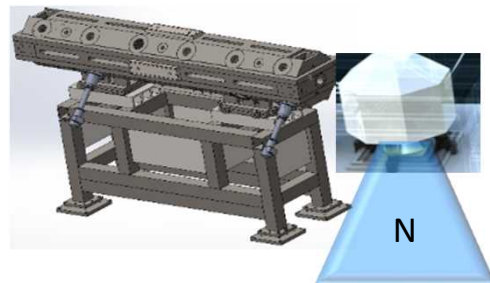
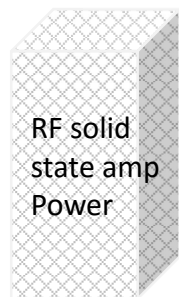
中性子誘導即発γ線を利用した、塩素元素検出。
高速中性子線：コンクリート内部まで入り込む

普及型： RANS-II~III (2.49 MeV)開発

RANS-II ・ものづくり現場導入型：
・可搬型プロトタイプ
(実証実験＋安全性耐久性試験)

2.49MeV

Li target



2017: 2.49MeV
accelerator assemble,
2018;neutron beam

非破壊検査システムのイメージ



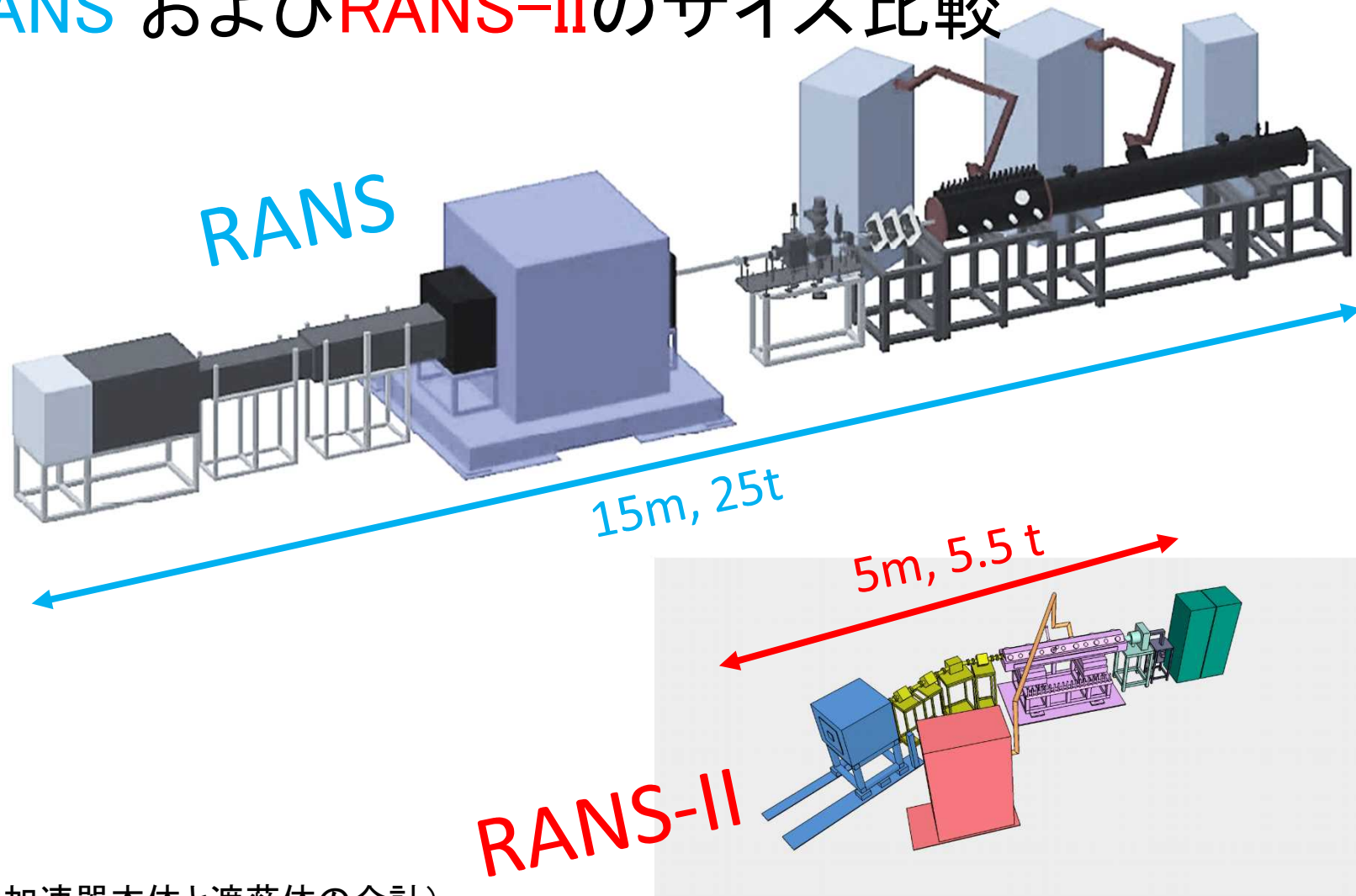
放射線障害等防止法第10条 および 関連規定(平成17年7月改定) **Japanese regulation 4MeV>linac**

- 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

現場利用へむけた挑戦 RANS-II (2.49 MeV)開発

compact neutron system

RANS およびRANS-IIのサイズ比較



(重量は加速器本体と遮蔽体の合計)



RANS-II 2.49 MeV 現場導入型 小型中性子線評価分析装置

全長5m～ 7月 施設検査合格

日常的な非破壊観察へ向けた、整備・高度化へ

Li Target
shielding
system

Li-target
exchange
system



RANS-II さらにる小型化へ向けた開発 →工学実験棟にて、超小型陽子線加速器開発



2018年度納品後の様子、
位置高さ調整など終わった
後の様子
東工大:林崎研究室 との
共同研究

Non-destructive inspection; infrastructure

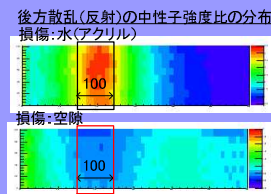
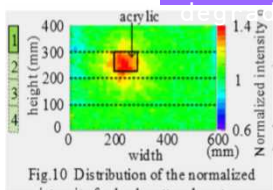


See through concrete
**In the pavement :
reflected imaging**

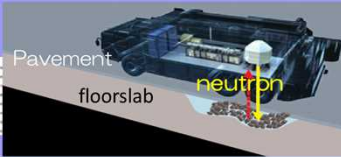
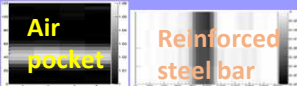


**Compact Neutron
Anytime, anywhere**

Visualization of



Transmission imaging



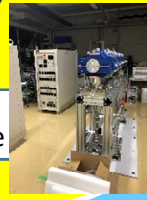
RANS : 15m, 25ton MeV~meV



**RANS-II : ~5m
E=700keV~meV**

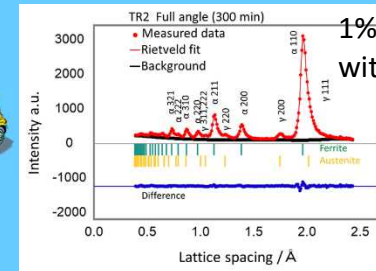
Floor-standing

**RANS-III
Transportable**



retained austenite
fraction measurement

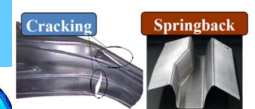
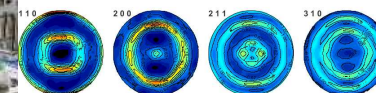
Diffraction volume fraction, texture evaluation



1% agreement
with J-PARC

New steel
development

Texture evolution



On-site use

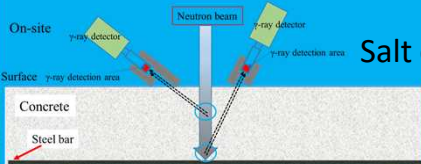
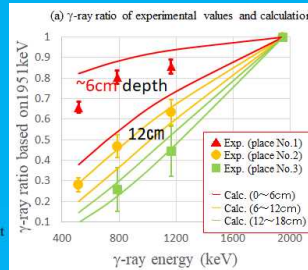
PGAA Salt detection of concrete

Element analysis on site



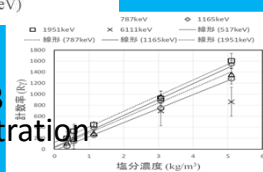
Moradi bridge collapse

Image of non-destructive measurement



Salt distribution

0.3~5kg/m³
Salt concentration



・組織からの支援

	支援
装置開発	放射線変更申請
	放射線管理 など
利用・運用	教育
	放射線管理(個人線量)
研究	研究交流

・産業連携

- ✓日本鉄鋼協会（鉄鋼企業との共同研究や連携）
- ✓日本コンクリート工学会（土木、建築関連企業との連携）
- それぞれ、計測技術の標準化へ向けた働きかけにつながる

		2019年度の例	
共同研究	企業	5件（1～3年契約）	インフラ関係（現場、製造） ものづくり関係
受託試験	企業	1件（1.5年）	ものづくり（検出器）
受託研究	企業	1件（年更新）	ものづくり（現場利用検討）
秘密保持	共同研究検討 お試し		ものづくり インフラ 非破壊計測応用
RANS利用や小型導入、中性子利用相談件数			80件以上

海外、国内連携、人材育成

Cooperation, collaboration

海外連携		活動
(中国) 西安交通大学	理研-西安交通大学連携 センター	・博士課程大学院生受入れ (2014年— 6名)3名博士号取得済 ・非常勤教授として講義
(独)ユーリッヒ総合研究所 中性子科学センターJCNS	MoU	毎年度 Joint Workshop開催 RAP-JCNS (場所交互)
(仏)Saclay LLB		毎年 RANS訪問、相互情報交換
(中国)清華大学		特別講義など



Xi'an Jiaotong
University



★人材育成、海外、国内ともに
国内共同研究: 10大学
研修生受け入れ: 6名ほど/年

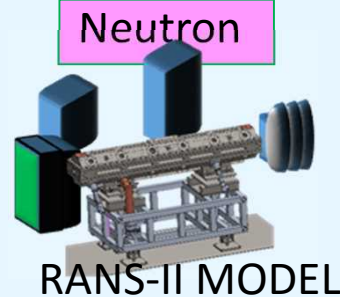
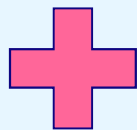


今後の展望

理研RANSが目指す 現場評価分析装置 現場で活躍する中性子計測システム

現場 非破壊検査(評価分析)
据置型 Floor-standing type

X-ray, X線、電子線とともに活躍する中性子
Electron SEM, TEM



現在ニーズの50%が
X線で観察できない

屋外現場 壊さずその場で観察
可搬型 Transportable type



Transmission
imaging

Observation from the surface
Salt concentration,
Visualization of degradation floor slab

1. 日常利用可能な中性子源システムの実現

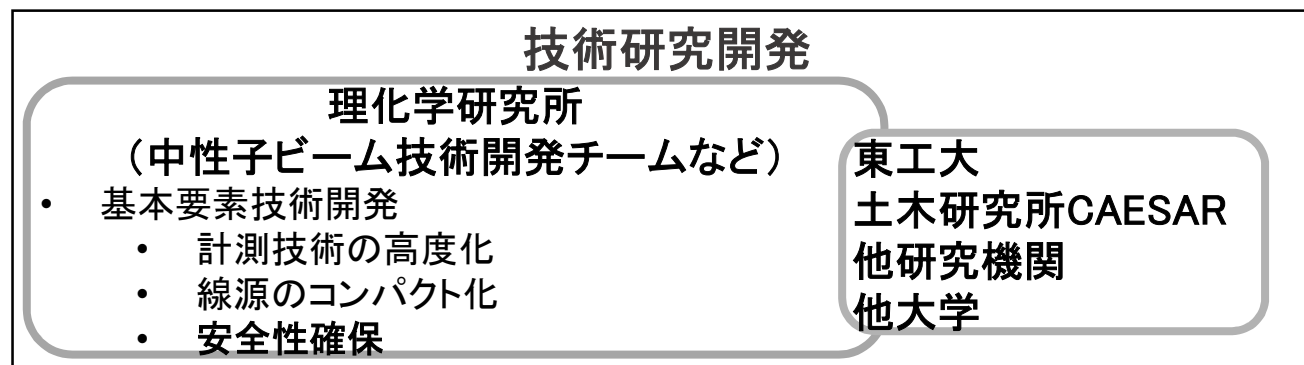
1. 安全稼働(低放射線環境、安全性確保)
2. 容易な運転

2. 定量評価分析可能 Good S/N measurements for quantitative analysis (No powerful source, but proper)

3. メンテナンス・廃棄も考慮 As few as possible of activation products

中性子計測技術の標準化： 小型中性子源普及

- 中性子線によるインフラ非破壊計測技術の標準化取り組み例



- ・コンクリート工学会 (JCI) [中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関する研究調査委員会] (2019年度— 小林孝一委員長 (岐阜大))
- ★技術研究組合(国交省 土木研究所による特定を取得済み) (設立準備中)

- ・コンクリート標準示方書への反映
- ★「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)」
- ★「塩害橋梁維持管理マニュアル(案)」への反映

- JCI委員会メンバー:
- 岐阜大学
 - 理化学研究所
 - 理科大学
 - 金沢大学
 - 愛知工大
 - 東京大学
 - 首都大学
 - 香川大学
 - 立木研究所
 - 建築研究所
 - (公財)鉄道総研
 - (一財)電力中研
 - (株)NEXCO総研
 - (株)竹中工務店
 - (株)大林組
 - (株)中研コンサル
 - (株)清水建設
 - など

- 中性子線によるものづくり計測技術の標準化:ISOなど今後

今後のスケジュールと必要な支援

	開発課題	2020年以降具体的な実施内容	予算
RANS	高度化、高輝度化	サンプル位置強度50倍	2000万/年 (2020年~2023年) 2021年は 2億円必要
RANS-II	中性子散乱計測システム 開発整備高度化	減速材反射材導入	2000万円/年 (2020年~2023年)
		ToF実験	
		短パルス発生:イオン源高度化	
RANS-III	超小型加速器開発	RANS-II'から500MHzへ	8000万円/年 (2020年~2023年) 車載準備:2億円
		位相制御、4分岐調整 LLFRシステム開発	
	屋外利用用中性子発生 ならびに計測	屋外使用ターゲット開発 軽量遮蔽システム	

国に対する要望 普及(屋内)・屋外利用へ向けて

- 中性子線によるインフラ非破壊計測技術の現場導入
 - 中性子線の屋外利用に対する国からのサポート
- コンパクトな中性子源を、ものづくり現場への導入サポート