

原子力委員会殿

放射線の産業利用

令和4年度先行研究  
超大型X線CT装置を活用した  
産業のデジタル化技術の開発等に係る調査事業

成果説明

サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合

令和5年5月

# 本調査事業の提案概要

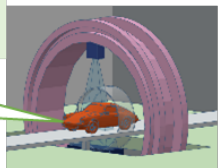
- 新機構の中で、CPE技術を用いた日本型ものづくりDXを実現するための技術開発・研究開発を通して、我が国が国際競争で再び優位性を発揮し、また、日本そして世界の中長期の課題解決にも貢献することを目的とする。
- 以上の目標を達成するため、新機構の中で下記の研究テーマを行う。
  - ① 超大型X線CTシステム技術の研究開発
  - ② 超大型X線CTのための画像処理基盤技術の高度化
  - ③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化
- なお、超大型X線CT装置の開発およびその後の展開にあたっては、ドイツ・フラウンホーファ研究機構との国際連携を積極的に推進する。

## ① (超大型X線CTシステム技術の研究開発)

- 自動車、自動車部品、航空機部品等の大型機械部品や電気部品のデータを丸ごと取得
- 世界初の高エネルギー・ガントリー式超大型XCT装置を設計開発し実装する

ガントリー式  
超大型X線CT装置

自動車1台  
丸ごとスキャン



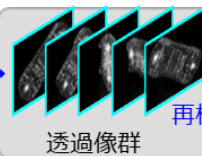
## ② (超大型X線CTのための画像処理基盤技術の高度化)

- 超大型X線CT装置で計測したデータを処理し、被検体の非破壊検査や形状計測を実施
- 高画質化、高速化、大規模3D画像処理および他の装置由来のデータのハイブリッド化・標準化研究開発を行う

大規模3D画像処理



XCT スキャン



透過像群

再構成計算



3D ボリューム画像



スーパー  
コンピュータ

## ③ (現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化)

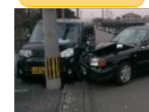
- 福島県内の企業等と連携し、その課題解決のためのユースケースによる先導的研究を実施。また、現物計測やシミュレーション等に基づくCPEソフトウェアツールを開発。
- 現物計測データを活用するためのデータ構造化技術等を開発し、標準化を行う。

サイバー空間 VS フィジカル空間

衝突シミュレーション



衝突試験  
実際の事故



# テーマ①②③に対する調査内容及び実施体制の一覧表

テーマ	調査内容	実施体制	福島県
① X線CT/デジタル化拠点および超大型X線CTシステム技術に関する課題調査	(1) X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査	委員会 + 外部再委託 (Fortec Architects(株))	
	(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査	委員会 + 組合員再委託 (日立製作所)	
② 超大型X線CT装置のための画像処理基盤技術の高度化調査	(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査	委員会	会津大学、福島高専より委員参加
	(2) データプラットフォームに関する調査 (割愛)	外部再委託 (株)White Hart	
③ 現物データ活用によるものづくりの精緻化・効率化調査	(1) -1 X線CTによる金属AM (付加製造) 部品の欠陥検出および形状計測	組合員実施 (三井E&Sシステム技研)	(株) NTS社 (外注) 金属AMによる部品試作
	(1) -2 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決	外部再委託 福島県ハイテクプラザ + 組合員実施 (アーク、ITC、NSL)	福島県ハイテクプラザ
	(2) XCC (Xray Car crash) に関する海外技術調査	出張による調査	

# ① X線CT/デジタル化拠点および超大型X線CTシステム技術に関する課題調査

項目	概要
①(1) X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ アンケート・ヒアリングによる拠点要件の調査<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 超大型X線CTを中心とするX線CT/デジタル化拠点について、ユーザー企業のニーズ等を調査</li></ul></li><li>➤ 成果物<ul style="list-style-type: none"><li>➤ ヒアリング結果に基づく委員会での検討によって、拠点の基本計画（設備・施設要件の整理と建屋及びレイアウト）の原案を作成</li></ul></li></ul>
①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 超大型X線CT装置の技術課題の洗い出しと、技術開発計画の立案</li><li>➤ 技術開発を盛り込んだ、超大型X線CTの基本設計を実施</li></ul>

# ①－(1) X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査

## ●概要

### ➤委員会活動

- 民間企業等の知見者や放射線の産業利用技術を専門とする大学研究者を含めた委員会を設置

### ➤ヒアリング実施（次ページ）

- 超大型X線CT技術の活用及び中長期的な事業とするための施設、設備及び機能等のインフラの要件に関する文献調査および産学官のステークホルダーに対するヒアリングを実施

### ➤建屋レイアウト案作成

- ヒアリング結果を元に、設備・施設の要件を整理しレイアウト案を作成
  - 建築要件：規模、ゾーニング、動線、諸室配置・居住性・デザイン、セキュリティなど
  - 電気設備要件：受変電設備、発電設備、幹線設備、蓄電池設備、太陽光発電設備など
  - 機械設備要件：給排水衛生設備、空気調和換気設備など
  - 構造要件：構造計画の基本方針、浪江町防災ハザードマップから見る留意事項、近隣地盤の調査など

# 超大型 X 線 C T 施設に関するアンケート及びヒアリング調査

## ●調査先：自動車 4 社、自動車部品 2 社、重機・航空機 1 社、電気部品 2 社、大学 1 校

### ① 測定物

- 自動車は長さ 5.5m×幅 2m×高さ 2m の車両全体 (0.1~0.5mm の解像度)
- EV 用バッテリー等のモジュールに関しては、より高い解像度 (0.05~0.4mm) を期待。
- 航空機企業では 2m×2m×1.5m のジェットエンジンコンポーネント (0.2mm 解像度)

### ② 利用目的

- 自社開発・組立製品に対する品質検査、リバーズ評価等
- バッテリー等の納入モジュールに対しては、形状・品質検査等

### ③-1 利用頻度

- コスト数百万円では 10 回/年・社程度、数十万円では数十回/年・社。  
コストによって頻度は異なる。

### ③-2 利用形態等

- 開発車両・部品では、秘匿管理が必須となるため自社 (含関連会社) での計測が中心
- リバーズ等では撮像委託が中心

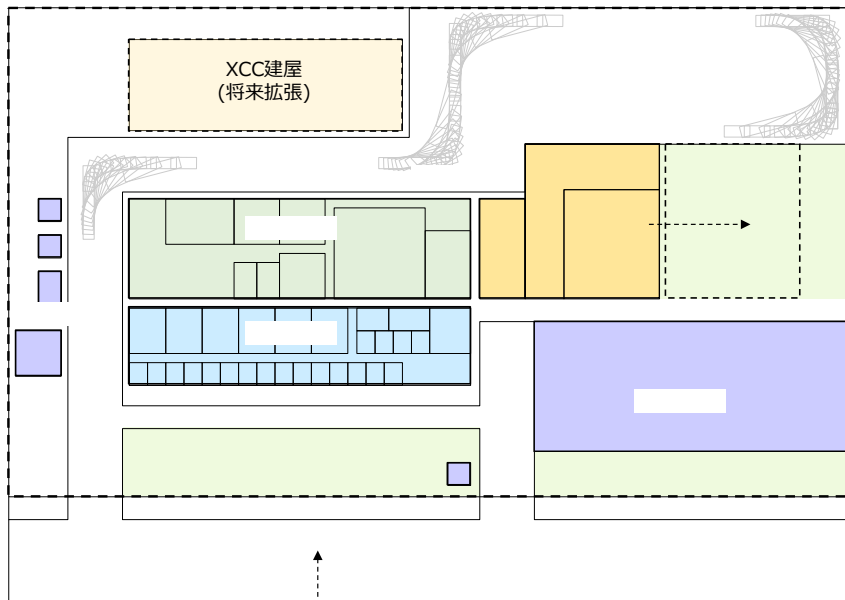
### ⑤ 設備施設への要望

- 撮像範囲を絞った  $\mu$  フォーカス機器開発、XCC や光学測定、材料特性測定機器等の隣接
- 機密対応：計測準備エリア、計測エリア、データエリア (国内サーバー使用)
- サポート体制：計測指導や意見交換、計測後のデータ分析、撮像データの CAE モデル化



# 建屋レイアウト案の検討

- 前述一覧表と国内外施設の視察や文献調査から建屋レイアウト案を検討
  - 必要諸室と、建物機能に必要な付帯施設(機械室・トイレ等)を見込んだ規模計画
  - 人の通行等と資材搬入等が明確に区分けされ、人と車の交錯を避けた配置計画
  - 機能性に配慮した形状を基本としつつ、周辺景観に馴染むデザイン
  - 居住性に配慮した設えを積極的に採用し、気持ち良く働くことのできる環境づくり



建屋レイアウト案

(敷地面積約21,000㎡、建屋面積約8,000㎡)



建屋パース

# ① X線CT/デジタル化拠点および超大型X線CTシステム技術に関する課題調査（続）

項目	概要
①(1) X線CT技術/デジタル化拠点の中長期事業化等に関する予備調査	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ アンケート・ヒアリングによる拠点要件の調査<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 超大型X線CTを中心とするX線CT/デジタル化拠点について、ユーザー企業のニーズ等を調査</li></ul></li><li>➤ 成果物<ul style="list-style-type: none"><li>➤ ヒアリング結果に基づく委員会での検討によって、拠点の基本計画（設備・施設要件の整理と建屋及びレイアウト）の原案を作成</li></ul></li></ul>
①(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 超大型X線CT装置の技術課題の洗い出しと、技術開発計画の立案</li><li>➤ 技術開発を盛り込んだ、超大型X線CTの基本設計を実施</li></ul>



# ①－(2) 超大型X線CT装置の設計に関する調査

## ① 研究開発計画の立案

超大型X線CT装置の技術課題の洗い出しと、技術開発計画の立案  
以下の要素技術開発を、令和5年から3か年で実施する計画を立案

- －X線源：線量率アップ、多方向照射試験、X線源軽量化、加速器設計、耐久性評価
- －回転ガントリー：回転速度最適化、たわみ評価と計測、スライド機構構造、耐久性評価
- －X線検出：CTシミュレータ整備、コリメータ有無評価、次世代検出器開発
- －再構成：ゆがみ補正、散乱線除去、演算高速化、3Dモデル再構成

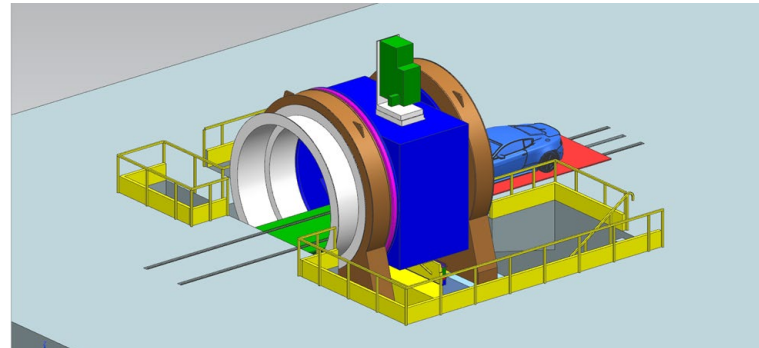
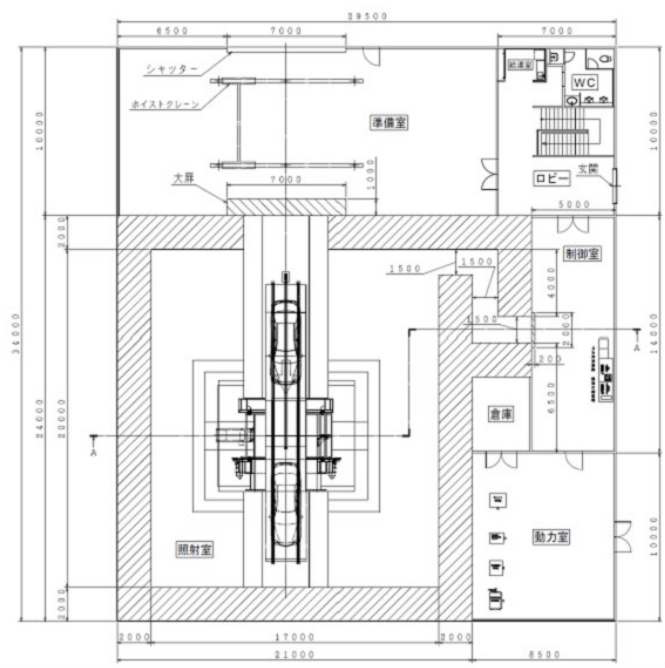
## ② 基本設計

技術開発を盛り込んだ、超大型X線CTの基本設計を実施

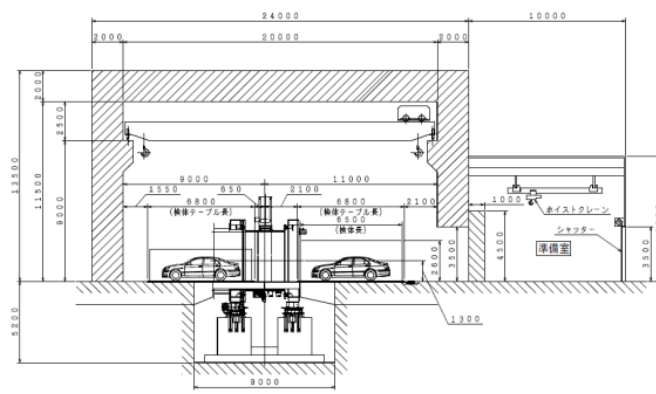
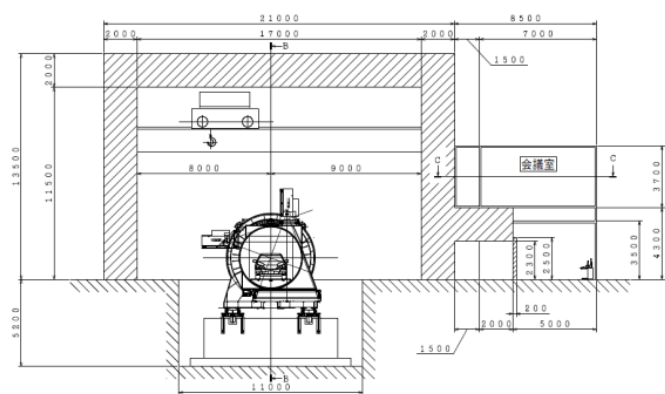
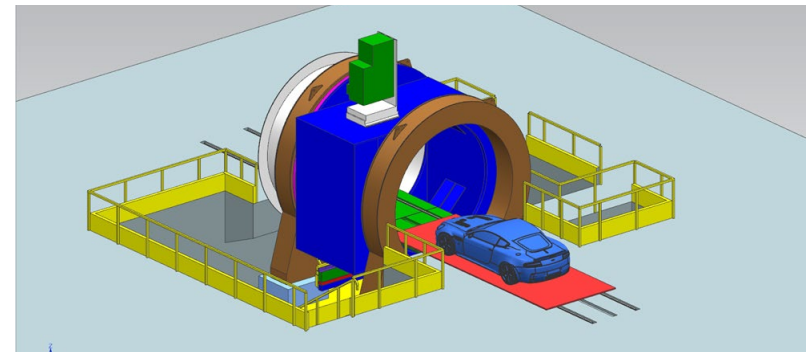
- －超大型X線CT装置の構成
- －超大型X線CT装置の性能仕様
- －超大型X線CT装置を構成する各機器の装置仕様
- －要素技術技術開発により、
  - » 透過力性能
  - » 計測時間性能が大きくアップする。

撮影視野	直径3.7m、軸方向6.5m
走査方式	標準：シングルローテート方式 高精細：ダブルローテート方式
CT画素サイズ	標準：0.6mm、高精細：0.3mm
X線源	X線最大エネルギー：9MV
検出器	一次元アレイ検出器(半導体センサ) チャンネル数：2850ch
透過能力	鉄30cm ⇒ <b>32cm</b>
CT透過能力	シングルローテート：鉄27cm ⇒ <b>30cm</b> ダブルローテート：鉄23cm ⇒ <b>26cm</b>
計測時間 (乗用車)	シングルローテート：2.3日 ⇒ 2.3日 ダブルローテート：8.4日 ⇒ <b>5.87日</b>

# 超大型X線CT装置の基本設計



3D CAD  
モデリング



3面図

## ② 超大型X線CT装置のための画像処理 基盤技術の高度化調査

項目	概要
②(1) 超大型X線CT画像処理基盤技術についての研究動向調査	<ul style="list-style-type: none"><li>• 動向調査<ul style="list-style-type: none"><li>• 委員会活動による最新研究動向の文献調査</li><li>• 専門家セミナーによるCT技術の応用の調査</li><li>• 企業ヒアリングによる必要技術調査</li></ul></li><li>• 研究開発項目の立案</li><li>• 講義シラバス案作成</li></ul>
②(2) データプラットフォームに関する調査 (割愛)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 超大型X線CT等からの大量のデータの効率的な利活用を行うためのデータプラットフォームに関して調査<ul style="list-style-type: none"><li>• 欧州GAIA-X、CATENA-X、Data-EX等国外（欧州）の先行事業の状況調査</li><li>• 国内産業の反応</li></ul></li><li>• 日本の製造業で新たなデータ連携のあるべき姿として検討が必要な事項の提言</li></ul>

# ②-(1) 超大型 X線 CT 画像処理基盤技術についての 研究動向調査

## ① X線 CT 画像処理に関する最新研究動向調査

- 委員12名が各専門分野の最新研究を文献により調査  
(メンバ: 会津大、福島高専、東大、都立大、一橋大、理研、産総研)
  - CT画像処理・応用をはじめとして、機械学習、画質評価、形状モデリング、寸法測定、シミュレーション、可視化、大規模データ処理、アーカイブ、アノテーションなど広範囲に調査
- ⇒ CT技術のフル活用のためには画像・形状処理技術の全般に渡る研究開発が必須

## ② 専門家セミナーによるCT技術の応用に関する調査

- セミナー 1 : CT画像活用ソフトの機能紹介  
領域分割、ノイズ除去、厚み計算、配向解析、CAD比較、欠陥解析、メッシュ生成
  - セミナー 2 : 製造業におけるCT装置活用事例紹介  
寸法測定、鋳造巣分布検査、測定機の使い分け、リバース、設計・製造の連携強化
- ⇒ 装置の大型化、データ処理自動化、測定の高速度化・低コスト化などCT技術の発展に期待

## ③ 企業ヒアリングによる必要技術調査

- ヒアリング 1 : CT撮像・データ処理サービス業者  
CAD面生成の自動化、平面・円筒面への自動整形  
超大型CTへの期待: EVの車体全体の歪み・断熱性評価など
- ヒアリング 2 : CT装置メーカー  
大型部品・ユニット・EVの大型電池など高エネCTへの期待増  
CT画像処理に精通した技術者の育成も急務



# 調査に基づく研究実施項目の立案

## • 三つのテーマについて研究を実施





### ③ 現物データ活用によるものづくりの 精緻化・効率化調査

項目	概要
③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査	③(1)-1：X線CTによる金属AM（付加製造）部品の欠陥検出および形状計測 ➤ 金属AM部品のX線CT画像を用いた、機械学習による欠陥検出と形状計測の自動化のFS
	③(1)-2：福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決 ➤ X線CTスキャンにより作成したCAEモデルによるシミュレーションによって、熱電対による温度計測の高精度化を行うケーススタディ
③(2) XCC (Xray Car Crash)に関する海外技術調査	ドイツ フラウンホーファーEMIの、車両衝突時の現象を実時間でX線透視撮像を行うXCC (Xray Car-Crash)の訪問調査

# ③(1)-1 X線CTによる金属AM（付加製造）部品の欠陥検出および形状計測

## ●概要

X線CTによる金属AM部品の欠陥検査の需要は大きいですが、画像による欠陥検査は目視に頼っており、一方、AIによる自動検出も学習に膨大な工数が必要であるため、これらがX線CTの大きな導入障壁となっていた。

本調査では、形状計測に関して福島県内企業と共同で以下のようなFS調査を実施した。

- ① 少数の教師データによる機械学習(AI)で内部の欠陥を3次元で自動検出する技術
- ② 部品形状計測を行い、設計モデルとの差異を評価する技術
- ③ 上記解析データ活用の有用性および課題

## ●実施内容

図1に示す福島県内企業作成チタン製サンプル（埋め込み欠陥付き：図2）に対し、X線CT撮像を行い、図3に示す解析システムで欠陥検出(図4)、形状計測を実施した。

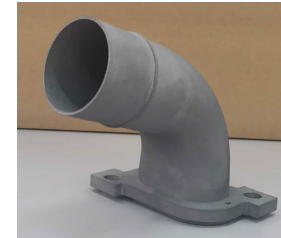
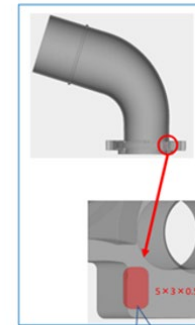


図1 チタン製サンプル



埋め込み欠陥

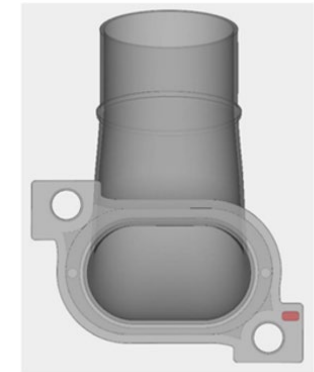


図2 人工欠陥の埋め込み

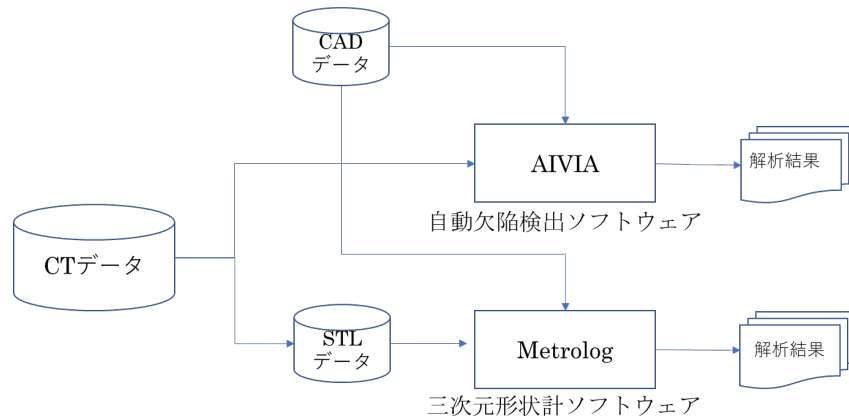


図3 処理の流れ

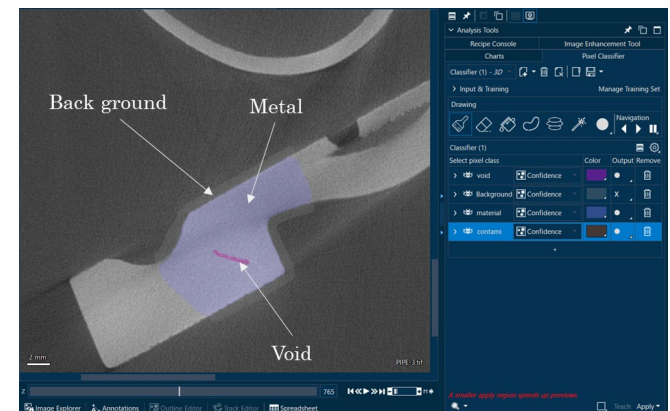


図4 自動欠陥検出結果



# 実験結果と評価

## ●実験

### ① 自動欠陥検査の実験

取得したCTデータに対し、機械学習による自動欠陥検出手法を適用することで埋め込み欠陥を含め、空包、異物など微細な内部欠陥を3次元的にかつ自動で検出できることを確認した（図4）。

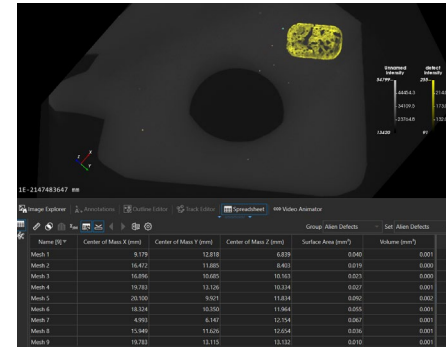


図4 機械学習による自動欠陥検出

### ② 破断試験による検証

サンプルを破断し、断面の顕微鏡画像とCT断面画像との比較評価を行い、埋め込み欠陥の形状、位置、姿勢は両者でほぼ一致していることを検証した（図6）。

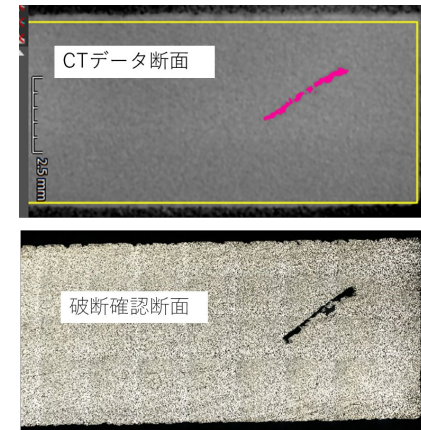


図5 破断試験による検証

### ③ 3D形状計測実験

CTデータから抽出されたサンプル表面の3次元点群データから設計モデルとの寸法形状比較評価を行えることを確認した（図6）

## ●評価・課題

① 3Dデジタルデータの活用が作成したサンプルの品質保証において極めて有用であることを確認した。

② 今後の展開として、熱交換器のように、内部にさらに複雑かつ微細な構造を持つ部品の品質保証およびCAE解析による現物での性能検証への適用が考えられる。

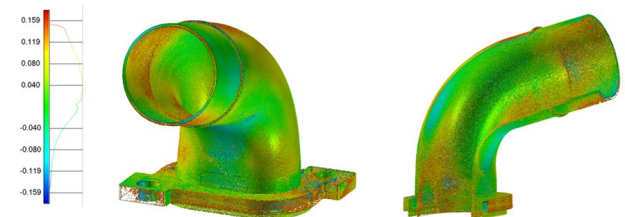


図6 3D形状計測

# ③(1) -2 : 福島県ハイテクプラザと連携した県内企業の課題解決

## ●概要

- 福島県内企業から、電気炉を昇温する場合に計測温度に差が生じる事例が報告されている。
- 温度計測を行うシース熱電対は、外観からは内部構造が確認できない。
- そこでX線CTにより内部構造をモデル化し熱伝導解析により内部構造の違いによる計測温度の差異を予測する。
- この結果を県内企業にフィードバックすることで電気炉の機能向上が期待できる。

## ●実施内容

- ①シース熱電対のCT撮像によるモデル化
- ②電気炉の熱伝導解析
- ③電気炉を使つての昇温実験
- ④熱伝導解析と昇温実験データの解析

シース熱電対

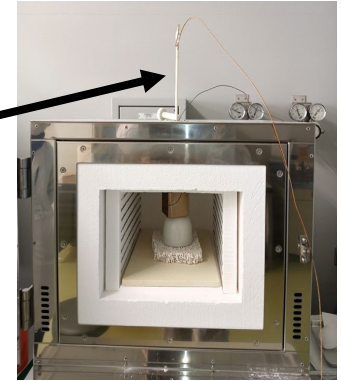


図1 電気炉外観

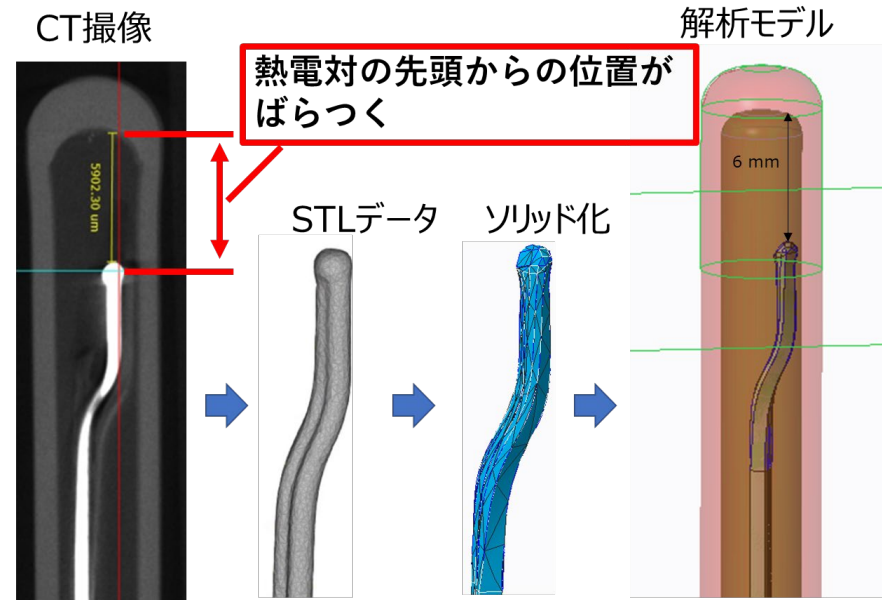


図2 シース熱電対 CT像と解析モデル

# 実施内容と結果

- 二つのセンサに付き、CT撮像、モデル化、熱伝導解析、昇温実験を実施。
- 二つのセンサについて、CT撮像によりセンサ部の先端位置の違いを確認
  - B-0：（熱電対センサ部が先頭から0 mm）
  - B-6：（熱電対センサ部が先頭から6mm）
- グラフに示すように、このセンサ部の先端位置の違いにより熱電対センサの温度出力が変化することと、実験で計測した温度とシミュレーションが示す温度に相関があることが確認できた。

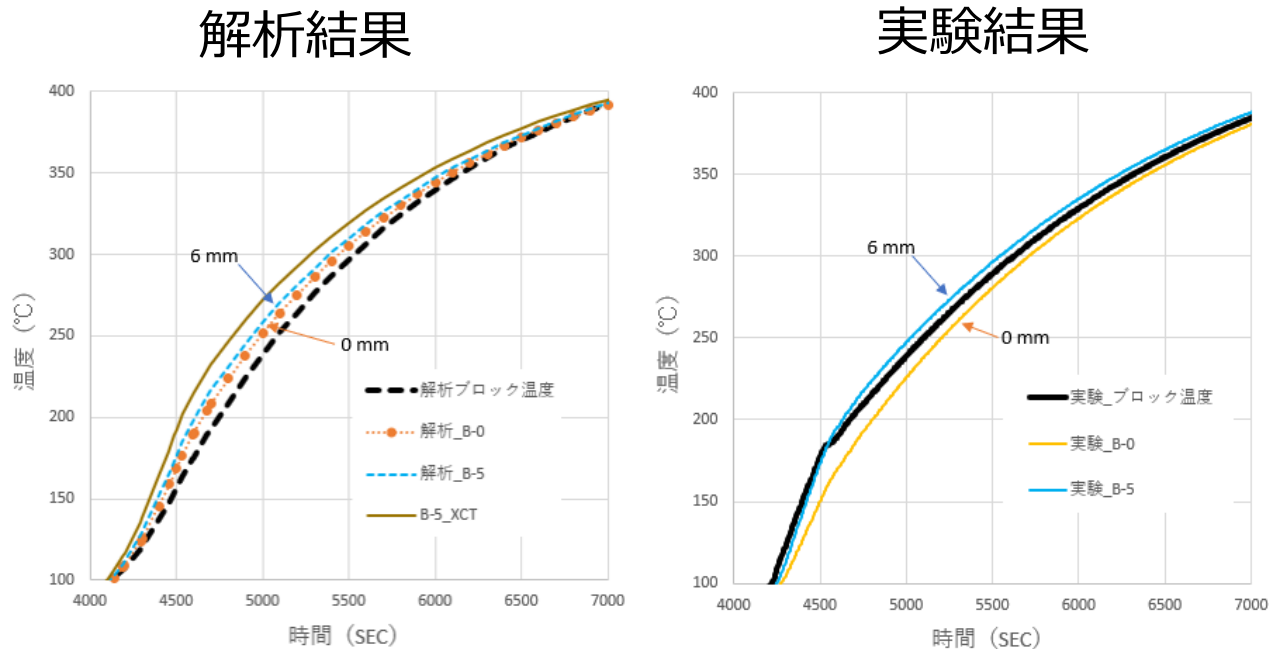


図4 解析結果と実験結果比較（部分拡大）（B-6センサ：6mm、B-0センサ：0mm）

### ③ 現物データ活用によるものづくりの 精緻化・効率化調査（続）

項目	概要
③(1) X線CTデータを元にしたデジタル化技術とデータ活用に関する調査	<p>③(1)-1：X線CTによる金属AM（付加製造）部品の欠陥検出および形状計測</p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ 金属AM部品のX線CT画像を用いた、機械学習による欠陥検出と形状計測の自動化のFS</li></ul> <p>③(1)-2：福島県ハイテックプラザと連携した県内企業の課題解決</p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ X線CTスキャンにより作成したCAEモデルによるシミュレーションによって、熱電対による温度計測の高精度化を行うケーススタディ</li></ul>
③(2) XCC (Xray Car Crash)に関する海外技術調査	ドイツ フラウンホーファーEMIの、車両衝突時の現象を実時間でX線透視撮像を行うXCC (Xray Car-Crash)の訪問調査

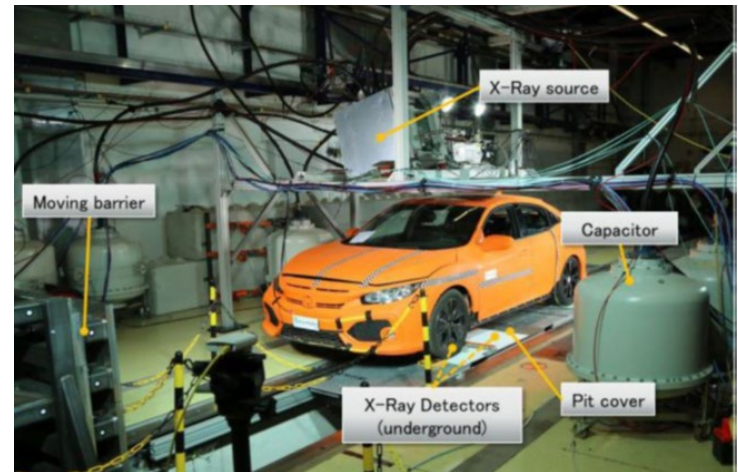
# ③ – (2) XCC (Xray Car Crash) に関する 海外技術調査

## ●背景・目的

- XCC (Xray Car-Crash) とは、車両衝突時の現象を、X線を利用して車両の内部を透視し、実時間で可視化することで、解析する装置と技術であり、近年ニーズが増えてきている。
- この装置はドイツ、フ라운ホーファーEMIが保有しており、同所を訪問し設備の見学・説明を受けるとともに、連携についても意見を交換し今後の対応を検討する初動とする。

## ●訪問調査による成果

- 装置はニーズに応える幅を拡大すべく、LINAC (高出力X線発生器) や超高速フラットパネル検出器の採用などにより逐次更新されており、実機を確認することで、装置概要を理解した。
- 自動車だけでなく、防衛、航空宇宙でも展開できるX線高速度動画撮影の装置構築の基本情報の取得ができた。



XCC装置 (EMIからの説明資料より)



LINAC (EMIからの説明資料より)



# アプリケーションと課題

## ●アプリケーション

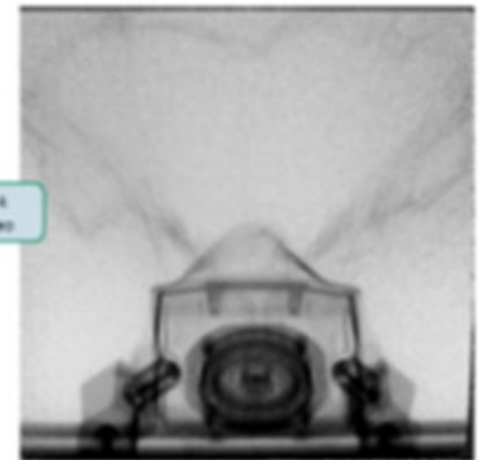
➤XCC装置を利用し、もしくは部材を使用して、X線を用いた高速度撮影が実運用されている。

### ➤実行例

- 車両内部品の動的現象の動画取得
- エアバッグの爆発での現象観察
- ブリットの貫通試験
- 容器内爆発
- バッテリー内部の爆発等

エアバッグの破裂  
(EMIからの説明資料より)

Airbag Testing  
1 kHz with LINAC



## ●今後の課題

- 日本国内でも同様のニーズがあると推測されるが、周知が不足していると感じる。
- 日本でも汎用化すべくプロモーションが必要であり、実車CTのようなサンプル事例の取得、装置情報の獲得のための継続調査が必要であろう。

ご清聴ありがとうございました。