

# 三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム (次世代3次元内外計測の評価基盤技術開発) プロジェクト終了時評価 補足資料

平成29年1月18日

経済産業省産業技術環境局計量行政室

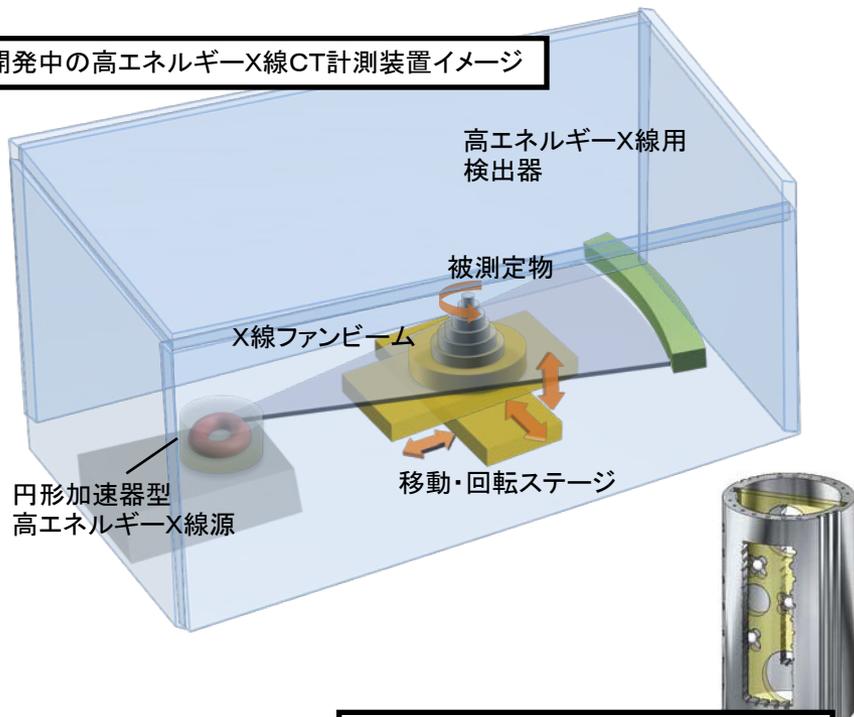
# 目次

1. 事業の概要
2. 事業アウトカム
3. 事業アウトプット
4. 当省(国)が実施することの必要性
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等
7. 費用対効果
8. 事前評価結果
9. 提言及び提言に対する対処方針

# 1. 事業の概要

<b>概 要</b>	金属製品、大型部品等の寸法を高精度で計測可能な高エネルギーX線CT計測装置、その計測性能を客観的に評価するための手法を開発し、得られた知見を国際標準化につなげるとともに産業界に普及することを通じて、我が国のものづくり基盤を強化し、経済成長・国際競争力強化に貢献することを目的とする。
<b>実施期間</b>	平成25年度～平成27年度（3年間）
<b>実施形態</b>	国からの直執行（国立研究開発法人産業技術総合研究所及び株式会社日立製作所への委託事業）
<b>予算総額</b>	4.4億円 (平成25年度:1.5億円 平成26年度:2.1億円 平成27年度:0.7億円)
<b>実施者</b>	国立研究開発法人産業技術総合研究所 株式会社日立製作所
<b>プロジェクトリーダー</b>	国立研究開発法人産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門 高辻利之(部門長)

開発中の高エネルギーX線CT計測装置イメージ



計量標準となる評価用ゲージのイメージ

○現在、異種材料を含む複雑・精緻な内部形状を有する数十cmオーダーの大型部品の精密測定を評価する技術がない。

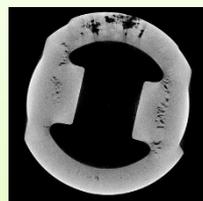
○評価技術を確認するために必要な計測装置、計量標準となる評価ゲージ、及びそれらを用いて計測性能を客観的に評価する（校正）手法を開発。

○技術開発の成果をもとに、標準化提案を積極的に行い、日本発の計測評価技術を客観的かつ国際整合性のとれた技術として世界でより広く利用できる環境整備を目指し、それにより、ものづくり分野を中心とした産業競争力強化につながる事が期待できる。



## 産業界への寄与

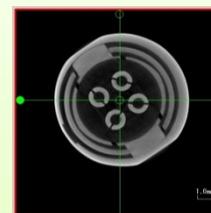
- 複雑内部構造をもつ鋳造製品の出来形寸法検査、鋳造欠陥の検査への利用。
- 非破壊検査（分解作業の不要化含む）、自動車衝突実験における変形量の計測、固形ロケット燃料やコネクタ断面の検査への利用。



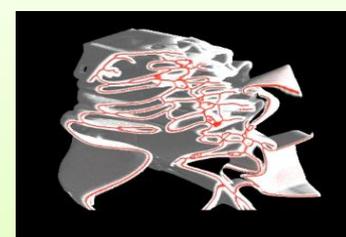
鋳物の鋳造欠陥検査



自動車クラッチの部品の三次元寸法計測



コネクタ、ケーブルの内部検査



クラッシュして変形した自動車パーツのX線CT画像  
(出典元: 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻・鈴木研)

出荷、受け入れ時の寸法検査やメンテナンス時の測定で使用するだけでなく、鋳造欠陥の形状や由来、組み立て状態の構造解析等への応用により製造、試作工程の工期短縮にも活用できると期待される。

## 2. 事業アウトカム

事業アウトカム指標 (妥当性・設定理由・根拠等)	目標値(計画)	達成状況 (実績値・達成度)	原因分析(未達成の場合)
<p>目標最終年度32年度予定</p> <p>①高エネルギーX線CT装置の普及(300億円)。 (2020年頃、既存の3次元測定機の市場《推定1000億円/年》の3割が置き換わることを期待)</p> <p>②高エネルギーX線CT装置による検査事業の売り上げ見込み等経済波及効果。 (自動車分野における新素材、複合材料、モジュールなど、新エネルギー分野における風車の羽、燃料電池、リチウムイオン電池、航空宇宙分野におけるノズル、タービンプレードなどの検査への適用)</p> <p>③高エネルギーX線CT装置を利用した計測方法の国際規格を策定する。 (グローバルな評価指標で品質の信頼性を与えることによる我が国の基幹産業の後押し、国際競争力強化)</p>	(事業開始時)	—	—
	(事業終了時)	<p>①共同研究及び技術相談を通し、計測用X線CTの企業での事業化に向けた技術支援を実施している。(一部達成)</p> <p>②物理標準整備計画に基づき29年度までにX線CTによる幾何形状の標準供給体制を整備するための研究開発を推進中である。(一部達成)</p> <p>③ISO/TC213/WG10における計測用X線CTの性能評価法規格開発のプロジェクトリーダーを獲得した。(一部達成)</p>	—
	(事業目的達成時)	—	—

### 3. 事業アウトプット (1)

課題	計画	実績	
① 高エネルギー微小X線源の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>微小線源サイズをもつX線源に適した装置とそのターゲットを開発する。目標線源サイズは、100 <math>\mu\text{m}</math>とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>株式会社光子発生技術研究所の持つX線源技術を使い、新しいX線源として線源サイズ100<math>\mu\text{m}</math>、最大X線エネルギー3.5MVを開発した。</li> </ul>	達成
② 高分解能・高感度検出器の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>検出器の薄型化開発(従来装置の70%)を実施し、従来装置の約1.5倍である1000個以上の検出器配列を実施する。また、この稠密配列に対応したスリットを持つ検出コリメータを開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来装置の70%の薄型を実現した。この検出器の実装個数についてはシステム最適化を実施した結果、従来装置の約1.3倍である970個の検出器配列となった。また、この稠密配列に対応したスリットを有する検出コリメータ及び検出器ホルダを開発した。</li> </ul>	達成
③ 高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大寸法500mm以上、質量50kg以上の産業用部品の撮影に対応可能かつ、回転軸ぶれ及び回転角度の読み取り誤差について高精度なワークステーションを開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージとして、最大寸法600mm、最大積載質量50kgで、高精度撮像ができるワークステージを開発した。</li> </ul>	達成
④ CT装置のシステムの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転計画装置、画像表示装置、画像再構成ソフトウェア、画像表示コントローラを開発するとともに課題①～③において開発した各機器を統合し、高エネルギーX線CT装置のシステム製作を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転計画装置、画像表示装置、画像再構成ソフトウェア、画像表示コントローラを開発するとともに課題①～③において開発した各機器を統合し、高エネルギーX線CT装置のシステムを開発した。</li> </ul>	達成
⑤ 高エネルギー高分解能X線CT装置の整備	<ul style="list-style-type: none"> <li>高エネルギー高分解能X線CT装置を組み上げ、装置として完成する。空間分解能の評価指標として2.5<math>\text{mm}^{-1}</math>の実現を目指す。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高エネルギー高分解能X線CT装置を組み上げ、装置として完成した。空間分解能の評価指標として2.6<math>\text{mm}^{-1}</math>を実現した。</li> </ul>	達成
⑥ 高エネルギー・高分解能X線CT装置の性能評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発した高エネルギー高分解能X線CT装置の性能評価を本事業で開発した高エネルギーX線CT用分解能評価ゲージ(評価範囲0.05mm～5mm)を用いて検証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高エネルギー高分解能X線CT装置の性能評価を実施した。撮影視野300mmにおいて0.1mmの分解能を確認した。</li> </ul>	達成

## 3. 事業アウトプット (2)

課題	計画	実績	
① 計測結果の信頼性を客観的に評価する手法の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>分解能評価用ゲージ(評価範囲 50 μm ~ 1,000μm)の開発、製作、分解能評価手法の提案。</li> <li>測定誤差評価用(評価範囲 400 mm)の製作及び幾何学的誤差の校正手法の開発。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分解能評価用ゲージ(評価範囲50μm~5,000μm)の開発、製作を経て分解能評価手法を提案した。</li> <li>評価範囲 400mmの測定誤差評価用ゲージの設計、製作、校正を経て高エネルギーX線CTの幾何学的誤差の評価を行った。また、コントラスト分解能の評価用ゲージの設計、製作、評価を行った。</li> </ul>	達成
② 画像再構成技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>修正分割アルゴリズムの開発及び測定ワークの材質や構造に着目した画像品質の向上。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4分木分割トップダウン方式による修正分割アルゴリズム及び順投影アルゴリズムを開発し、既存FBP法と比較して画像品質の向上を確認した。</li> </ul>	達成
③ 画像活用のソフトウェアの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>新たな逐次再構成法の実現に必要なバックワードプロジェクション機能の開発。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>バックフォワードプロジェクションアルゴリズムを開発し、基本的な動作検証を行った。</li> </ul>	達成
④ 内部寸法計測の信頼性を評価する手法の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.05mmから400mmに対応する内部寸法の計測用ゲージ及び評価法の開発。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>寸法の測定範囲が0.05mmから400mmにおいて不確かさが1μmから4μmを満足する内部寸法評価ゲージを設計、製作し、X線CTにより効果を検証した。</li> </ul>	達成
⑤ 再構成における表面抽出の高精度化技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>4分木による適応的逐次再構成アルゴリズムの計算効率化、耐雑音性の高品質化。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>適応的逐次再構成に対応した表面抽出機能を実現した。既存のアルゴリズムと比較し、10倍以上の大幅な再構成ボリュームデータの容量削減及び演算時間の短縮を実証した。</li> </ul>	達成
⑥ 実CTデータへの適用による再構成ソフトウェア適合化技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>逐次再構成法をCT装置に実装するにあたり必要となるソフトウェアの開発。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線源の動作特性を把握したワークステージ駆動ソフトウェア、再構成ソフトウェアの入力データとなる計測データの変換ソフトウェア群を開発した。</li> </ul>	達成
① 国際標準化	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISO/TC213/WG10への標準化提案。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISO/TC213/WG10においてプロジェクトリーダー獲得、NWIP/CD投票への移行の決議を獲得。</li> </ul>	達成

### 主な成果(事業全体)

項目	論文数	国際標準への寄与	プロトタイプ作成
件数	10	1	8



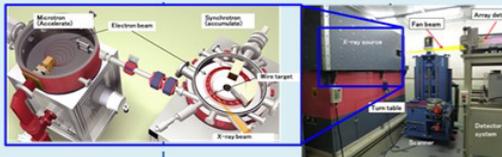
# 5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 (FY)

産総研コンソーシアム「3次元内外計測コンソーシアム」

高エネルギー高分解能X線CT装置の開発

eXTRACT®: Hi-energy Metrological X-ray CT



コンソ法人会員向けテストスキャン

産総研戦略予算プロジェクト「3D計測エボリューション」連携

アプリケーション事例蓄積

3D内外計測  
アプリケーション  
ノート化

成果普及  
一般装置ユーザー向け

計測用X線CT販売売上げ 30億 60億 90億 120億 300億

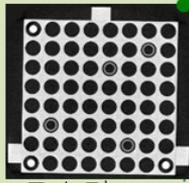
高エネルギーX線CT装置の普及

計量標準開発及びトレーサビリティ確立

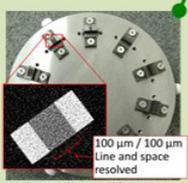
標準供給  
依頼試験開始

計測用X線CT用校正器物の校正普及

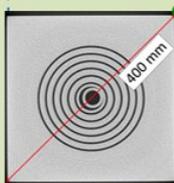
高エネルギーX線CT装置による検査事業の売り上げ見込み等経済波及効果



フォレスト・ホールプレート複合器物



高エネルギーCT分解能評価器物



内部寸法評価器物

高倍率レンズ用校正器物の構造検討及び実用化

低倍率レンズ用校正器物の材質検討及び実用化

関連工業会との連携による器物普及促進

適合性評価  
航空宇宙産業向け

樹脂製器物用材のX線被曝による寸法変化データ構築

情報校正周期  
国内共有化

フレームワーク開発

CDステージ

DISステージ

FDISステージ

ISO制定

対応JIS原案開発

WG10  
ラウンドロビン

NWIP/CDへの  
移行決議

NWIP/CD  
投票

DIS  
投票

FDIS  
投票

ISO国際標準  
制定

X線CT用語JIS原案  
作成準備委員会

事業終了

国内向け  
成果普及  
ラウンドロビン

修正技術的  
提案事項

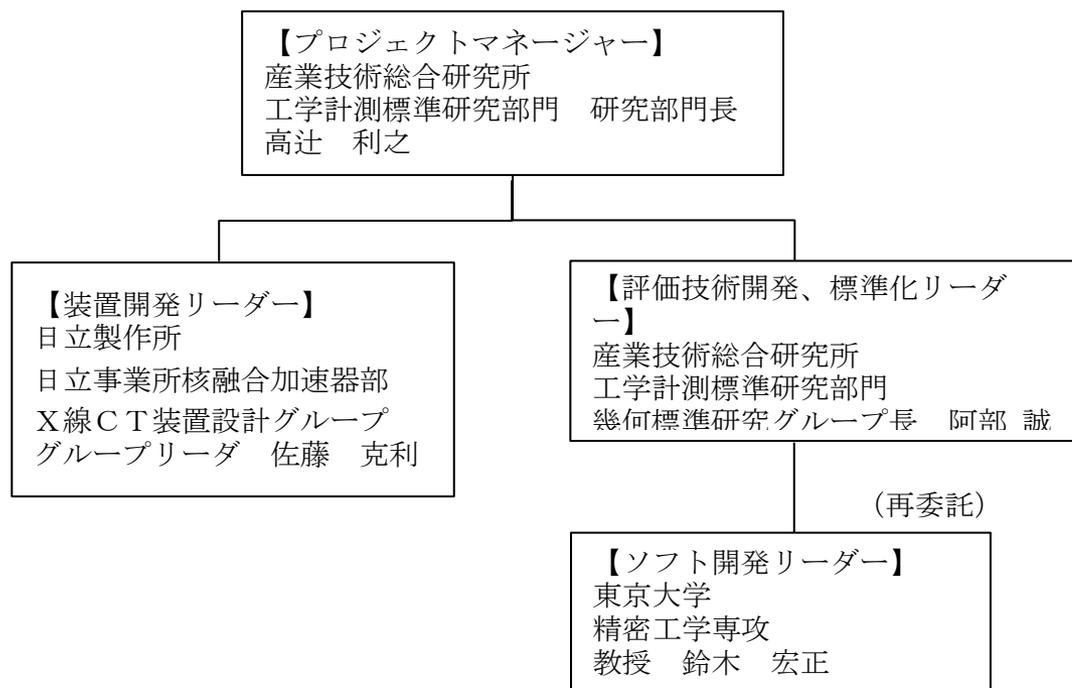
国内向け  
成果普及セミナー

普及技術的  
促進事項

適合性評価  
自動車産業向け

高エネルギーX線CT装置を利用した計測方法の国際規格を策定する

## 6. 研究開発の実施・マネジメント体制等



- 本事業のプロジェクトリーダー、プロジェクトマネージャーである産総研 高辻利之、阿部誠は計測用X線CTの国際標準草案を審議するISO/TC213/WG10における日本のエキスパートとして登録。高辻利之は本事業の国際標準化の課題となるISO 10360-11(計測用X線CT)のプロジェクトリーダーの指名を受け、継続して取り組んでいる。
- 本事業において開発のMeVクラスのX線源を取り扱うためには、第1種放射線取扱い主任者の資格をもつ者が管理監督し、本事業の開発内容について法令等に則って管理運営される放射線管理区域及びその管理体制が必要不可欠である。本事業の装置開発リーダーである日立製作所 佐藤克利氏、及び株式会社日立製作所日立事業所核融合加速器部(事業当時)はこれらの条件を満足した資格、放射線管理区域、および管理体制を保有して運用しており、本事業の推進にあたりこの資格及び体制のもとで研究開発に取り組んだ。
- 東京大学 鈴木宏正教授は、産業用X線CTの画像処理技術において世界的な権威として内外に広く知られている。修正分割とトップダウン方式を組み合わせた逐次再構成法を開発することをめざし、フォワードプロジェクション、バックワードプロジェクション、再分割の最適化及び投影像を用いた寸法計測などに取り組み、本事業で開発したシステムに統合し、その効果を検証した。

## 7. 費用対効果

- 投入された国費総額4億3700万円に対し、本事業のアウトプットとして他に例を見ない、高エネルギー高分解能X線CT装置及び計量標準と工業標準の一体開発が実現した。開発したX線CT装置はアルミで400 mm以上の透過力を有すると同時に、0.1/0.1 mmのライン・アンド・スペースを解像可能な性能を発揮した。計量標準及び工業標準の開発では、平成29年度のX線CTのための標準供給及び平成31年度のISO国際標準制定に向け、本事業の終了後も本事業のメンバが主導して開発を進めている。いずれも本事業のアウトプット目標を達成した上で引続き本事業のアウトカムの達成に向けて強力に研究開発を推進している。
- 計れないものは造れないことも広く認知されたことであり、そのため測定機の費用対効果を見積もるための方法として、測定機の技術革新が製品の技術革新に直結して生産性などの向上に大きく寄与する場合について、その製品に関する測定機に起因する経済効果を見積り、本事業が我が国の経済に及ぼす費用対効果をさらに見積もることとする。
- 自動車産業において、リコール発生件数は年間300件程度となっており、自動車の生産台数500～600万台程度との比率から、リコール1件あたりのインパクトは2万台／年となる。自動車1台あたりのリコール対策費用を10万円と見積り、高エネルギー高分解能X線CTによりこの内5件が未然に防止できると仮定すると、100億円の経済効果が見込まれる。
- CFRPの課題は高速成形と加工法の開発、製造コストと生産量の増加である。成形工程中に大量のカットロス、NG部品、期限切れ、品質保証用の試験片が生じ、30～50%が廃棄されているという。材料評価がいかに適切に高速に行えるかが、製品歩留まりを向上するにあたり極めて重要となる。CFRPの構造評価はX線CT以外に、欠陥を定量的に評価できる計測ツールはない。成形工程中に生じる平均廃棄量40%の2つの原因に対し、X線CTにより定量評価が可能になることで、廃棄量をそれぞれ半分にできるとすると10%に低減でき、全体で10%の廃棄量低減、すなわち生産歩留まり向上となる。自動車、航空機をはじめとして余りある需要に対し、生産量の増加は容易に吸収できるとし、30年時点で500億円の経済効果が見込まれる。
- 計測用X線CTそれ自体のマーケット開拓及び拡大による費用対効果に加え、日本を代表するものづくり産業と位置づけられる自動車及び炭素繊維材料について、計測用X線CTに直接に起因する経済効果を見積もったところ、32年度において600億円の経済的インパクトが見込まれる結果となった。ここに見積を行わなかった日本の他のものづくり産業に対する経済効果を含め、計測用X線CTの経済的インパクトは本事業において成された国費投入に対し、十分に応え得る

## 8. 外部有識者の評価等

### 8-1. 評価検討会

#### 評価検討会名称

次世代3次元内外計測の評価基盤技術開発  
プロジェクト終了時評価検討会

#### 座長

高増 潔  
東京大学大学院工学系研究科 教授

#### 評価検討会委員

#### 委員

安藤 正海  
東京理科大学総合研究機構 教授

兵頭 俊夫  
高エネルギー加速器研究機構 特別教授

古谷 涼秋  
東京電機大学工学部 教授

## 8-2. 総合評価

### 総合評価

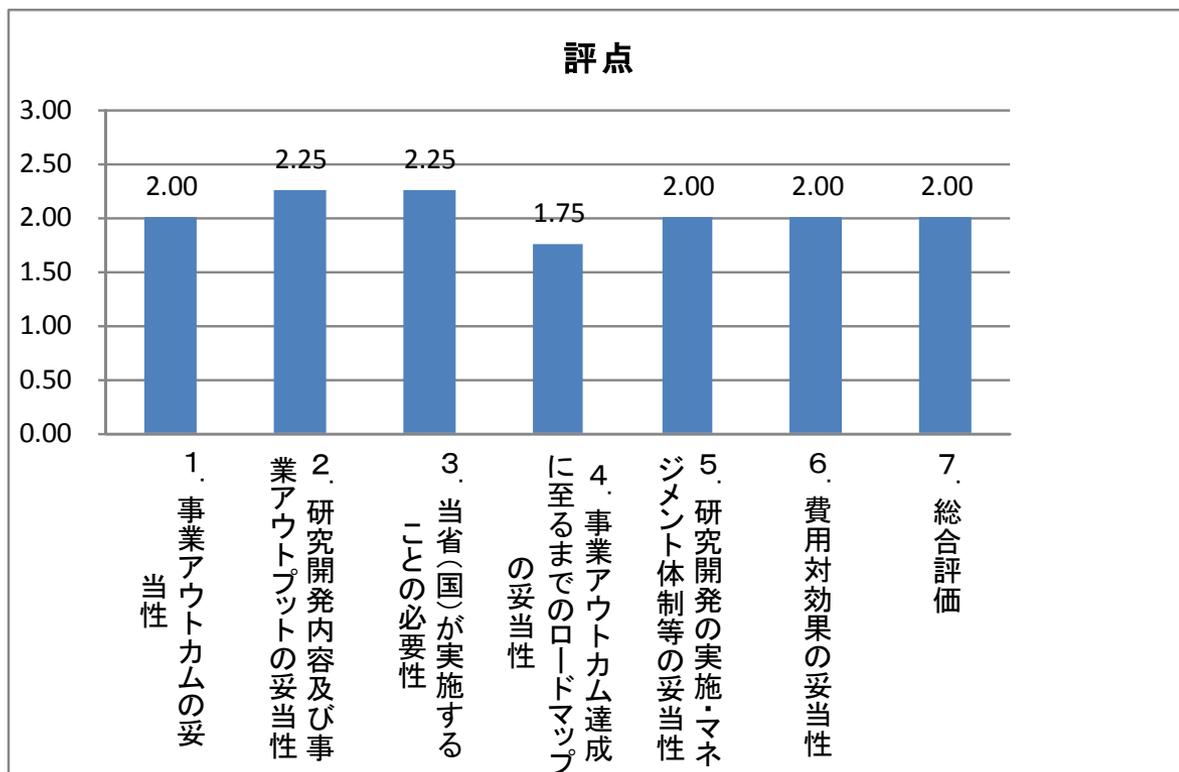
限られた予算の中で、各分野の専門家が協力してプロトタイプ of 装置を完成させたことは評価できる。併せて、線源サイズを $100\mu\text{m}$ にしたときの問題点が明らかになったことも価値がある。本装置により製品の内部の測定が可能になることによって、製品の内部状態についての新しい知見が得られる。国際規格を提案し、規格化への道筋を付けたことも今後の進捗が評価できる。

一方、アウトカムの方向付けは必ずしも明確でなかった。より先端的な技術開発への取り組みがあるともっとよかった。線源サイズの $100\mu\text{m}$ のままで、強度を上げる方法の開発は長期的視点で行わなければならないだろう。線源サイズと強度のトレードオフについて再検討するべきではないか。また、装置の価格が高く普及の妨げとなるが、価格を下げる可能性や技術の方向性も示されたい。

## 8-3. 評点結果

○「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト終了時評価において、評点法による評価を実施した。  
(評点が2点未満のものについて、その理由)

- 4. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップの妥当性について、装置の普及、売り上げの向上、国際規格発行のそれぞれが独立しており、連携が図られる記載となっていないことが改善すべき点に上げられている一方、「3次元内外計測コンソーシアム」による研究成果の社会普及、テストスキャン事業を通じた幾何計測のニーズの調査、国際規格作成の着手がされており、今後の達成が目標どおり進むと考えられることが評価されている。



**【評価項目の判定基準】**

評価項目1.~6.  
3点:極めて妥当  
2点:妥当  
1点:概ね妥当  
0点:妥当でない

**8. 総合評価**

(終了時評価の場合)

3点:実施された事業は、優れていた。  
2点:実施された事業は、良かった。  
1点:実施された事業は、不十分なところがあった。  
0点:実施された事業は、極めて不十分なところがあった。

## 9. 提言及び提言に対する対処方針

### 今後の研究開発の方向等に関する提言

- X線CT装置については、さらなる小型化・低価格化、供給企業の拡充、直交型の座標測定機に匹敵する空間分解能・空間精度を有する装置の開発が考えられる。多くの企業の参加を求めるのであれば、運営母体を作り各参加企業の秘密保持を保障しながらの共用施設の創生または拡充が望まれる。
- 先端的な計測システムの普及には国際標準化が重要である。このプロジェクトでは国際標準化を視野に入れ、実際に標準化を推進することができた。このようなプロジェクトに対する十分な支援が期待される。

### 提言に対する対処方針

- 本事業により、高エネルギー高分解能X線CT装置、評価用ゲージ及び国際標準案の一体開発が実現。特に、高エネルギー高分解能X線CT装置の性能に関しては400mmのアルミを透過して100 $\mu$ mの高分解能という世界的に見ても類を見ない性能を達成。
- 本事業終了後も産業技術総合研究所と日立製作所との共同研究によって実施される高エネルギー高分解能X線CT装置の技術開発の中で検討を行っていく。  
高エネルギー高分解能X線CT装置の普及については、産業技術総合研究所3次元内外計測コンソーシアムを通じて、民間企業との情報交換と利用促進を図るとともに、特に強い関心を寄せている企業会員に関しては装置使用のフィードバックを得て、一層高度な開発に資する情報の収集や装置の普及への工夫への取り組みを行う。
- 本事業の成果の国際標準化については、ISO/TC213におけるプロジェクトリーダーを獲得して規格開発を先導して進めることとなった。平成31年度の国際標準制定を目指して、関係各国と情報共有・連携を深め、また上述のコンソーシアムを国内対応委員会分科会として位置づけることにより日本の産業界の意見を反映した国際規格となるよう活動を推進する。