第１回次世代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
資料６

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

評価用資料

平成２８年１１月２８日

経済産業省産業技術環境局計量行政室
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

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
技術評価結果報告書（終了時評価）

プロジェクト名	次世代３次元内外計測の評価基盤技術開発
行政事業レビューとの関係	平成２６年　新 26-0002
上位施策名	科学技術・イノベーション
担当課室	産業技術環境局計量行政室

プロジェクトの目的・概要

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。

近年の工業製品の高機能化は、従来のような外形寸法のみを管理する製造手法では対応が難しいものとなってきている。また製品の内部欠陥は性能のみならず安全性にも影響するため、高精度に製品の内外の欠陥や寸法を計測する技術の開発が望まれているが、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寸法や形状を高精度に評価する技術がない。

本事業では高エネルギー微細Ｘ線源、および高分解能・高感度検出器をはじめとする基幹部品の開発・製作を経て、高エネルギー高分解能Ｘ線ＣＴ計測装置を実現する。また計測性能を評価するための分解能評価用ゲージをはじめとする性能評価用ゲージを設計・製作し、開発した高エネルギーＸ線ＣＴ計測装置の性能検証に供するとともに、計測用Ｘ線ＣＴの性能評価法にかかるＩＳＯ国際標準の確立に資する。

計量標準および工業標準に裏打ちされた高エネルギー高分解能Ｘ線ＣＴを実現することにより、国際競争力をもつ我が国のものづくり産業、たとえば自動車分野におけるモジュール部品の検査や、新エネルギー分野における流体機械部品や電池の検査など、既存の接触式または光学式測定機、あるいは透過力と分解能の両立しない既存のＸ線ＣＴ装置では対応が著しく困難であった産業計測ニーズに対し、有効なソリューションを提供することができる。

上位施策の中での位置付け

経済産業省では、我が国の製造業の大半を所管し、かつ、産業技術分野における知的基盤政策を推進する立場から、経済成長、産業競争力強化を図る。

特に、我が国が強みを有する「ものづくり」において、計測技術は製品やサービスの質及び量を定量化する重要な知的基盤であり、同時に計測結果の信頼性を保証するものさしとなる計測標準も計測技術を支える重要な知的基盤である。そのため、これら計測技術の知的基盤の整備を通じて、我が国の強みを活かし世界の競争に勝ち抜く「ものづくり」への支援に貢献し、さらには

国際競争力の維持・強化、安全安心の確保、イノベーション創出の環境整備に貢献する。

予算額等（委託）　（単位：百万円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	終了時評価時期	事業実施主体
平成 25 年度	平成 27 年度	―	平成 28 年度	産業技術総合研究所 日立製作所
H25FY 執行額	H26FY 執行額	H27FY 執行額	総執行額	総予算額
１４７	２１４	７６	４３７	４７６

Ⅰ．研究開発課題（プロジェクト）概要

１．事業アウトカム

事業アウトカム指標		
高エネルギーＸ線ＣＴ装置の普及		
指標目標値		
事業開始時（25 年度）	計画：―	実績：―
終了時評価時（27 年度）	計画：―	実績：―
目標最終年度（32 年度予定）	計画：３００億円	

事業アウトカム指標		
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		
指標目標値		
事業開始時（25 年度）	計画：―	実績：―
終了時評価時（27 年度）	計画：―	実績：―
目標最終年度（32 年度予定）	計画：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、タービンブレードなどの検査への適用。	

事業アウトカム指標		
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。		
指標目標値		
事業開始時（25 年度）	計画：―	実績：―
終了時評価時（27 年度）	計画：―	実績：プロジェクトリーダ獲得
目標最終年度（32 年度予定）	計画：計測用Ｘ線ＣＴの性能評価法にかかるＩＳＯ国際標準の制定。	

２．研究開発内容及び事業アウトプット

１）高エネルギーＸ線ＣＴ装置の開発

（１）研究開発内容

〈高エネルギー・微小Ｘ線源の開発〉

Ｘ線ＣＴの分解能を決定する要因は多数あるが、最も大きな要因はＸ線源の焦点サイズである。Ｘ線

のエネルギーがＭＶ級となると、その焦点サイズが小さくなるとターゲットの熱による溶融の問題等の熱問題が大きくなり、焦点サイズを小さくすことが技術的に難しい。現状の高エネルギーＸ線ＣＴは、ターゲットの熱問題のため十分に小さい焦点サイズでなく、この大きさの制限によりＣＴ画像の分解能もボケが大きくなる。また現在でもマイクロフォーカスＸ線ＣＴという技術があり、この焦点サイズは十分小さくＣＴ画像の分解能も高いが、Ｘ線エネルギーが低いため透過能力が小さいことが欠点である。

そこで本研究開発では、高エネルギーでかつ焦点サイズを小さくすることができる「みらくる」と名付けられた小型シンクロトロンをＸ線源に用いた。この新しいＸ線源は、電子線を加速するマイクロトロン部と、その加速した電子を蓄積するシンクロトロン部から成る（図１参照）。このシンクロトロン部には、ワイヤー型のターゲットが内蔵しており、シンクロトロン部に入射蓄積された電子は、シンクロトロン内部を周回する度に、このワイヤー型のターゲットと衝突して制動輻射によるＸ線を発生する。焦点サイズは、完全にワイヤー型のターゲットの太さで決まることから、直線加速器で問題となるターゲットの熱問題は回避できる。ワイヤー径は単純な製作上の問題であるので、事実上は数十マイクロメートル（μｍ）という細いワイヤー型ターゲットも可能である。しかしながら、このような細すぎるターゲットではＸ線の発生量が極めて小さくなることから、ある程度の太さのターゲットが必要と考えており、本研究開発では１００マイクロメートル（μｍ）とした。

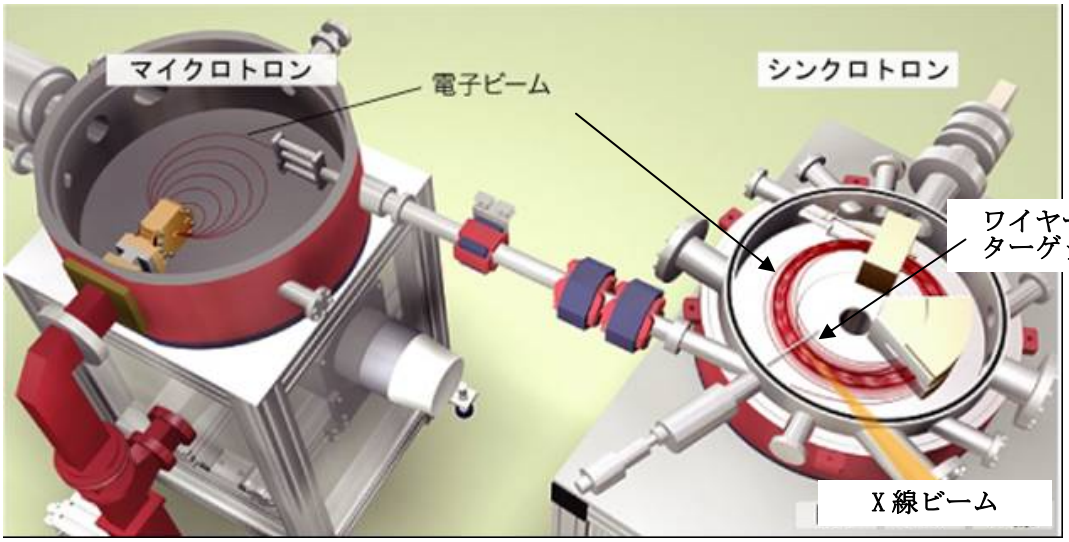

図１　「みらくる」の構造図

このＸ線源をＸ線ＣＴ装置のＸ線源として本格的に使用した例はなく、本研究開発においてＸ線ＣＴ装置用として新たに開発する必要があった。Ｘ線源としての仕様の他に、ＣＴ装置としての制御系の取合いや、放射線発生装置の使用許可に係る漏洩線量の仕様など多岐にわたることになった。主な仕様項目と仕様をまとめると以下となる。

１）電子運動エネルギー：　３．２５ＭｅＶ以上３．５ＭｅＶ以下

２）Ｘ線出力：　０．１（Ｇｙ／ｍｉｎ）以上、５．０（Ｇｙ／ｍｉｎ）を超えないこと。

３）Ｘ線焦点サイズ：　φ１００μｍ以下（タングステン製のφ１００μｍワイヤーによる）

４）漏洩線量率：　ビーム中心軸から前方６０度以上の領域で、線源から１ｍの距離において、１０（ｍＧｙ／ｍｉｎ）以下であること。

５）外部トリガによるＸ線出力ができること

６）繰返し周波数：　１秒間当たり５０～３００パルス

７）ＣＴ装置との信号取合（制御ＩＦ）を具備していること

〈高分解能・高感度検出装置の開発〉

高分解能・高感度検出装置は、測定ワークを透過して来たＸ線検出をする機器の総称である。ＣＴ画像の高精度化はＸ線源の焦点サイズを微細化するだけでは不十分で、検出装置に実装する検出器の高密度化を同時に実現する必要がある。この高密度化のためには、検出素子の薄型化、配列の稠密化、検出回路の多チャンネル化対応、データ転送系の多チャンネル化対応等々が必要となる。

検出器の薄型化に関しては、日立製作所で開発している高エネルギーＸ線ＣＴ用の現有のＨｉＲ検出器をさらに薄型化した新しい検出素子を開発した（本報告書では以下ＨｉＲ＋（ハイアールプラス）検出器と呼ぶ)。このＨｉＲ＋検出器により、従来の１．３倍の高密度配列が可能となり、検出器のチャンネル総数も現有の７５０チャンネルから、９７０チャンネルと増やすことができた。

検出器配列の高密度化に伴い、計測するＸ線ビームの太さも細くした。そのため、検出コリメータのサイズについても、現状の０．４mm幅から０．２mm幅へと細くした。また、検出器のチャンネル数が増えることに対応して、検出回路、ＡＤＣ回路、検出コリメータ、検出器ホルダを新たに開発した。図２に、高分解能・高感度検出装置のブロック図を示す。

開発した検出回路は、日立製作所で独自に開発して来た検出回路をベースに改良したものである。検出回路の構成は、検出器からの計測信号を処理するためＤＡＢ基板（Data Acquisition Board)、信号処理のタイミングを制御するためのＴＣＢ基板（Timing Control Board)、ＤＡＢ基板とＴＣＢ基板を実装するためのバックプレーン基板、検出回路用直流電源、検出回路筐体等からなる。検出器の実装密度の向上により処理する検出器チャンネル数が約１．３倍に増える。現有機と同じ検出回路で回路製作をすると、その大きさも約１．３倍となり、検出装置の大きさが非常に大きくなる。これはＸ線ＣＴ装置全体の設置スペースを大きくするだけでなく、省エネルギーの観点からも看過できない。そのため現有機の検出回路が片側実装基板である点を改良して、両面基板実装の検出回路を新たに開発した。開発した検出回路の基板１枚で３２チャンネル（片側１６チャンネル×２）の検出データを処理することができ、これは現有機の２倍の処理量である。

開発したＡＤＣ回路は、検出回路の出力信号をＡＤ（アナログデジタル）変換し、最終的に１６ビットのデジタルデータに変換するものである。このデジタルデータはメモリ上に一時収納された後、イーサネットで接続された運転計画装置に転送される。このＡＤＣ回路は、日立製作所で独自に開発して来たＡＤＣ回路をベースに、多チャンネル化ための改良したものである。

開発した検出コリメータは、検出器に入射するＸ線を細いビームにコリメートして分解能を高める役割と不要な散乱線が検出器に入ることを防ぐ遮へいの役割を担っている。個々の検出器は、検出コリメータの後段に配置されるが、この配置を正確なものとするために検出器ホルダがある。開発したＨｉＲ＋検出器は、この検出器ホルダに実装するものとなる。さらに、検出器はＸ線だけでなく可視光にも感度を有するため、検出器ホルダ部で完全に遮光をしている。検出コリメータも、検出器ホルダも、共に微細精密加工が必要である。日立製作所では、この微細精密加工技術を、過去二十年以上にわたり蓄積、高精度化してきた。今回開発した検出コリメータと検出器ホルダも、この微細精密加工技術を使って製作をしている。

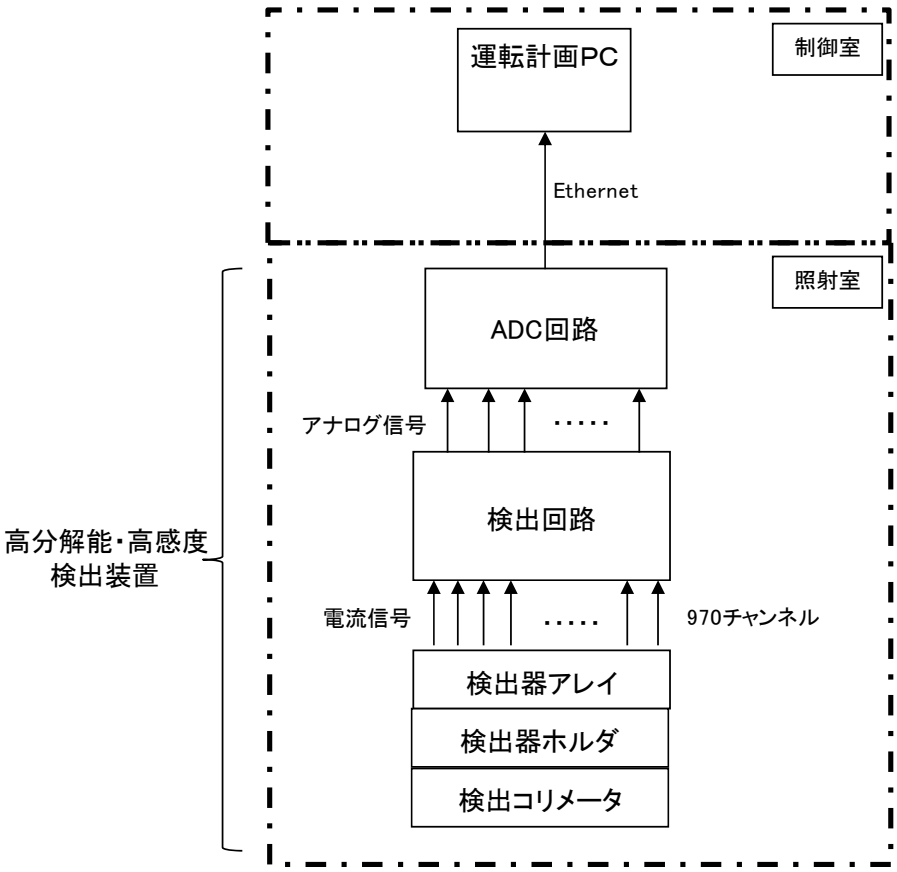

図２　高分解能・高感度検出装置のブロック図

〈高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの開発〉

開発したワークステージの装置構成は４軸制御とし、回転駆動装置（Ｃ軸）、昇降駆動装置（Ｙ軸）、並進駆動装置（Ｘ軸）、前後駆動装置（Ｚ軸）を有する。そしてワークステージの他に中央制御盤、運転操作盤、トリガーパルス発生器も含まれている。ワークステージの主要仕様を下表に示す。

表　ワークステージの主要仕様

項目	仕様
駆動軸数	４軸(回転/昇降/前後/並進)
制御軸数	４軸(回転/昇降/前後/並進)
ストローク範囲	回転：３６０°エンドレス 昇降：９００mm 前後：６００mm 並進：５０mm

撮影方式	・第３世代撮影 ・ＨｉＢｒｉｄ撮影 ・透視撮影 ・静止撮影
撮影視野	Φ３００mm、Φ４５０mm、Φ６００mmで切替式
積載質量	最大５０ｋｇ

開発した高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの精度仕様と開発結果（実測値）を以下に纏める。

１）駆動部仕様値と実測結果

（１）絶対位置決め精度

No.	軸名称	仕様値	実測値
1	Ｘ軸	±０．００６mm以下	±０．００３mm以下
2	Ｃ軸	±０．００８度以下	±０．００３度以下
3	Ｙ軸	±０．０１５mm以下	±０．００８mm以下
4	Ｚ軸	±０．０７３mm以下	±０．０５０mm以下

（２）繰り返し位置決め精度

No.	軸名称	仕様値	実測値
1	Ｘ軸	±０．００６mm以下	±０．００２mm以下
2	Ｃ軸	±０．００８度以下	±０．００３度以下
3	Ｙ軸	±０．０１５mm以下	±０．００７mm以下
4	Ｚ軸	±０．０７３mm以下	±０．０３３mm以下

（３）静的精度仕様

No.	項目	仕様値	実測値
1	Ｘ軸真直度	水平：０．０２１mm以内	水平：０．００６mm以内
		上下：０．０３０mm以内	上下：０．００２mm以内
2	Ｘ軸水平度	±１．５mm／m以内	±０．０１mm／m以内
3	Ｚ軸真直度	水平：０．０２１mm以内	水平：０．０１１mm以内
		垂直：０．０３０mm以内	垂直：０．００８mm以内
4	Ｚ軸水平度	±０．１２５mm／m以内	±０．０１mm／m以内
5	Ｃ軸鉛直度	±０．０１２mm／m以内	±０．００５mm／m以内
6	Ｃ軸テーブル面水平度	０．０７５mm以内	０．００５mm以内
7	Ｃ軸回転テーブルの振れ	０．０２１mm以内	０．００５mm以内
8	Ｙ軸鉛直度（前後方向）	±０．０２１mm／m以内	±０．０１３mm／m以内
9	Ｙ軸鉛直度（左右方向）	±０．０２８mm／m以内	±０．００７mm／m以内

中央制御盤は、高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージのインターフェース機器（Ｉ／Ｏユニット）の他、トリガーパルス発生器、システム装置の計算機類（運転計画ＰＣ、画像再構成用ＷＳ）を搭載したものである。

運転操作盤は、オペレータが高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージを運転操作するためのものである。

トリガーパルス発生器は、高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの各軸の動きに同期して、高エネルギー・微小Ｘ線源装置と高分解能・高感度検出装置が動作するように、同期用のパルスを生成するものである。　具体的には、高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージのテーブルに取り付けている位置検出器からの位置パルス信号を入力とし、その信号を分周した後、高エネルギー・微小Ｘ線源装置への照射トリガーパルス、高分解能・高感度検出装置への取込タイミングパルスと検出タイミングパルスを出力するものである。

〈ＣＴ装置のシステムの開発〉

ＣＴ装置のシステムの開発では、エネルギーＸ線ＣＴ装置の運転制御システム、画像再構成技術を開発した。具体的には、運転計画装置、運転計画ソフトウェア、画像表示装置、画像表示ソフトウェア、画像再構成ソフトウェアの開発製作を実施した。

運転計画装置は、高エネルギーＸ線ＣＴ装置を使ってどのような撮影をするかを計画し、その計画内容を、装置を構成する機器に情報転送する装置であって、オペレータはユーザインターフェースを介してこの計画を設定するものとなる。運転計画装置は、そのハードウエアとなる計算機システムと、運転計画ソフトウェアからなる。計算機システムには、外部機器との制御インターフェースを確立するために、ネットワークポートと、６４チャンネルのデジタル出力ボード、同じく６４チャンネルのデジタル入出力ボード（入力：３２チャンネル、出力：３２チャンネル）が必要となる。また、オペレータとのユーザインターフェースがディスプレイ上に常駐し、キーボードとマウスを使って運転計画を作り込んでいくものとなる。運転計画ソフトウェアは、Ｘ線ＣＴ装置を運転するための運転計画をオペレータが作成するためのユーザインターフェースを提供するとともに、そこで作成した計画データを、Ｘ線ＣＴ装置を構成する機器に情報転送する機能と、運転中の機器の撮影進捗状況をオペレータへ提供する状態表示機能をもつ。

画像表示装置は、ＣＴ撮影した計測データを使ってＣＴ画像を再構成し、既定の保存媒体に画像保存をするとともに、画面上にＣＴ画像を表示するものである。ＣＴ撮影と画像再構成・表示は、Ｎ断面の撮影が終わると、次のＮ＋１断面の撮影が始まり、そのＮ＋１断面の撮影と平行してＮ断面目の再構成が実施される。これにより、全体の撮影が完了してから、プラス１断面の再構成を待ってすべての断面の画像化が完了する。画像表示装置は、そのハードウエアとなる計算機システムと、画像表示ソフトウェアからなる。この計算機システムでは、再構成演算を所定の時間内に計算しなければならず、高い演算性能が必要となる。このため再構成演算ソフトウェアに合致した、計算機の仕様、コンパイラ性能が選定している。画像表示ソフトウェアは、ＣＴ撮影した計測データからＣＴ画像を計算する機能と、その結果の画像を表示する機能をもつ。また、再計算機能や、ビットマップ形式の画像変換の機能をもつ。

〈高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の整備〉

高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の整備とは、開発した各機器の据付作業と試運転調整作業のことである。

高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置は、最大Ｘ線エネルギー３．５ＭＶのＸ線を発生する放射線発生装置を使用する。このため、その使用に関しては法令に基づく許可が必要となり、さらにその前提としての放射線発生装置使用施設が必要である。この放射線発生装置の使用施設に関しては、十分な放射線遮へい構造を具備する必要があり、その建設コストも膨大となる。このため、使用施設として日立製作所で所有している放射線発生装置使用施設であるリニアク試験場（日立パワーソリューションズ勝田事業所内）にて開発を実施した。本リニアク試験場は電離放射線障害防止規則等の法令を満たす放射線使用施設であり、コンクリート約２ｍの放射線遮蔽のある建屋である。本開発でのＸ線源の遮蔽も十分であり、放射線発生装置の使用施設としての許可を取得済である。

リニアク試験場への装置の据付状況を作業手順は、以下の通りである。

1) ベースプレート据付
2) ワークステージ本体据付
3) 検出装置架台据付
4) Ｘ線源スライドベース据付
5) 位置調整ベース据付
6) 検出器ユニット等設置
7) Ｘ線源本体据付
8) 分電盤、配線ラック、電線管等の設置
9) 仮設防塵ハウス設置
10) エアコン等設置
11) 機器の精密アライメント
12) スライス可変コリメータ設置

整備が完了した高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の概観写真を図３に示す。

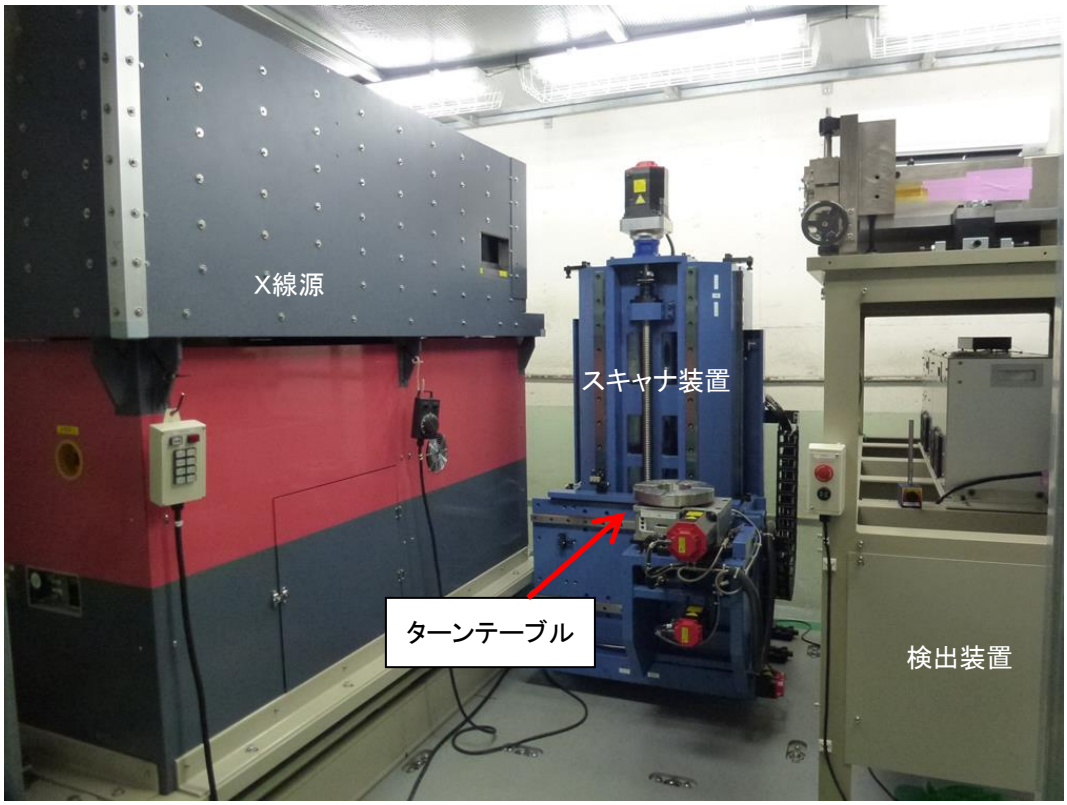

図３　高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の概観写真

装置の据付が完了した後に、試運転調整を実施。その後ＣＴ性能試験を実施した。ＣＴ性能試験として、空間分解能（ＭＴＦ特性）、Ｘ線ファンビーム性能、Ｘ線出力安定性、穴あき試験片による画質性能を確認した。

空間分解能の指標であるＭＴＦに関しては、ほぼすべての撮影方式において、理論予測と同等の性能を確認できた。しかしながら、最も空間分解能が高い、撮影視野：Φ300 のＨｉＢｒｉｄモードでは、予測性能（３０mm-1）に対して実測性能は２６mm-1 と下回る結果となった。この原因は、計測時間の間にＸ線源のターゲット駆動機構が発熱し、ターゲットが動いている（ターゲットドリフト）ためである。

空間分解能の評価指標であるＭＴＦ特性を測定した結果は以下の通りである。

ＦＯＶ	600mm	450mm	300mm
第３世代方式	理論：7.7 Lp/cm 実測：7.9 Lp/cm	理論：10.4 Lp/cm 実測：11.0 Lp/cm	理論：16.0 Lp/cm 実測：16.8 Lp/cm
HiBrid 方式	理論：15.0 Lp/cm 実測：15.5 Lp/cm	理論：20.3 Lp/cm 実測：20.3 Lp/cm	理論：30.0 Lp/cm 実測：25.9 Lp/cm

開発した高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置で使っている X 線ファンビーム形状は、左右方向±１５度、上下方向３mmのファンビームである。このファンビーム内でのＸ線出力の空間分布は、ファンビーム中心をピークに、左右均等な空間分布であった（図４参照）。一方、先のターゲットド

リフトにより、Ｘ線の照射開始からの経過時間によって、この空間分布が時間と共に変わっていることが分かった。この空間分布の変化は、直接ＣＴ画像へ影響があり、アーチファクトの原因や、空間分解能の劣化を引き起こしている。さらにＸ線出力の短時間変化を確認した（図５参照）。開発したシステムでは、ワークステージの回転に同期してＸ線を照射するようになっている。このとき、ワークステージの回転開始後、約１５秒で徐々にＸ線出力が大きくなる。ワークステージの回転開始直後は、約６０％の出力であるが、徐々に出力は大きくなり５秒後で約９０％、１０秒後で約９５％、１５秒後でほぼ１００％となる。ＣＴ撮影においては、このＸ線出力が小さい１５秒間のデータを使うとＣＴ画像にノイズやアーチファクトが発生するため、この１５秒間のデータを使わない撮影方法を採用した。すなわち、ワークステージの回転開始角度をゼロ度からではなく、マイナス方向に助走期間を設けている。

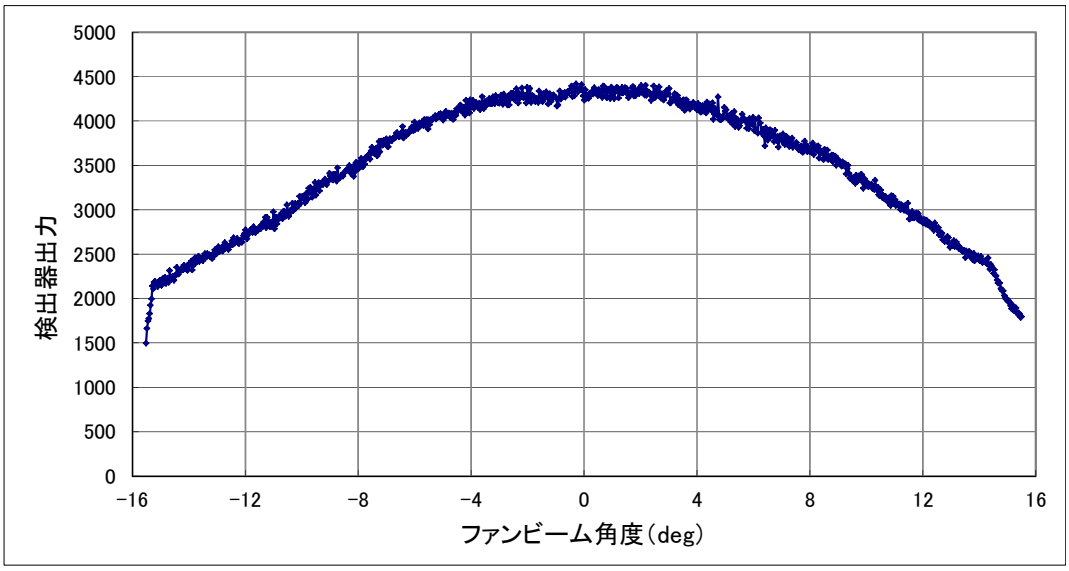

図４　Ｘ線出力の空間分布

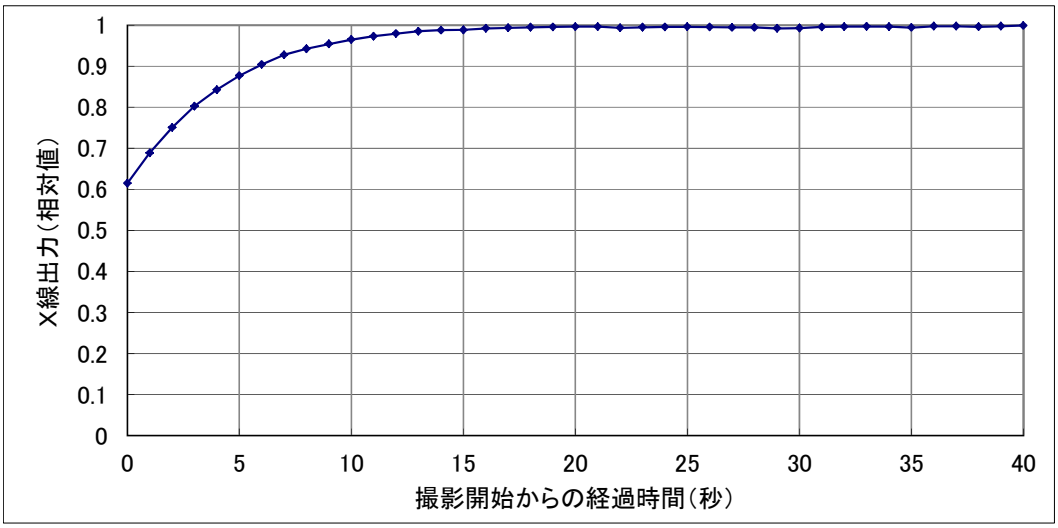

図５　Ｘ線出力の立ち上がりの様子

高エネルギー・微小Ｘ線源装置から発生するＸ線は最大エネルギー３．５ＭｅＶをもつ電子とタ

ングステン製ターゲットの相互作用で発生する制動放射のＸ線である。この制動放射によるＸ線のアルミ材での減衰曲線を測定した（図６参照）。Ｘ線の平均エネルギーは１ＭｅＶ程度であるが、透過長さが長くなるにつれて平均エネルギーは高くなる（線質硬化という）。減衰の全く無い透過厚さゼロでは、平均エネルギーは０．８２ＭｅＶであるが、５０ｍｍでは０．９４ＭｅＶ、１００ｍｍでは１．０９ＭｅＶ、２００ｍｍでは１．４７ＭｅＶとなっている。

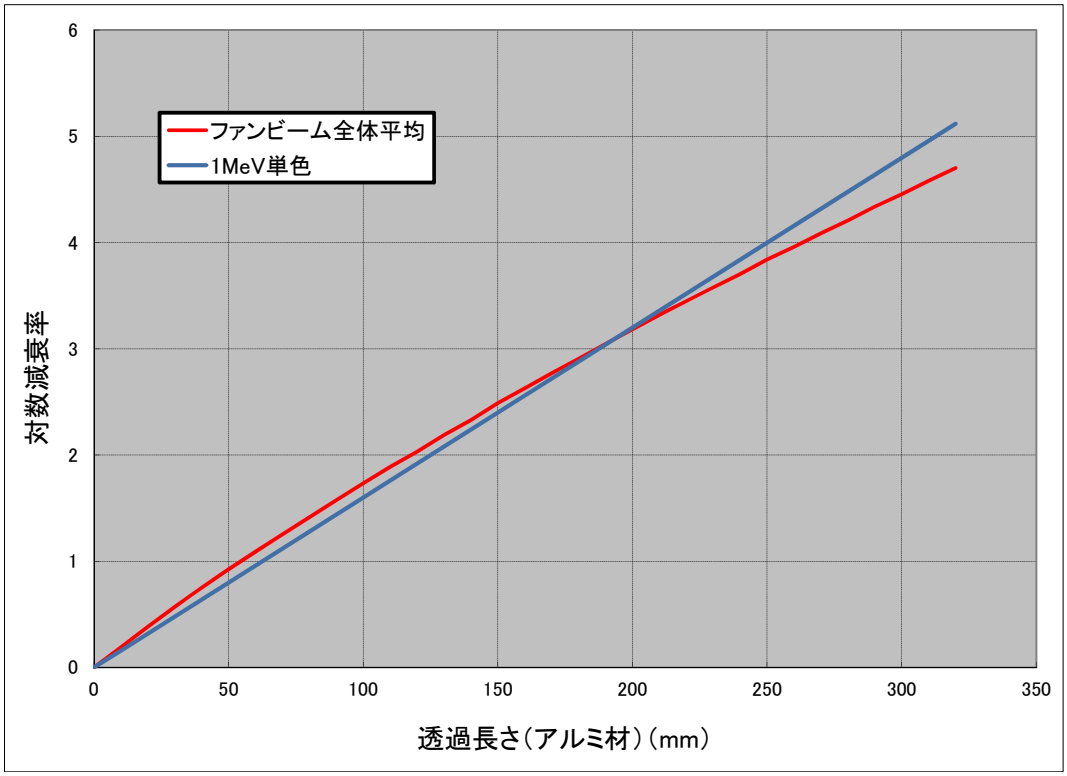

図６　Ｘ線減衰曲線

穴あき試験片の撮像試験結果を纏める。撮影した穴あき試験片は、ステンレス、アルミ、アクリルの三種類の材質で、直径は１００ｍｍで同じである（図７参照）。この円盤の中に、０．２ｍｍ、０．３ｍｍ、０．４ｍｍ、０．５ｍｍ、０．６ｍｍ、０．７ｍｍ、０．８ｍｍ、１．０ｍｍの八種類の穴があいている。また各径の穴は５個で中心間隔が穴直径と同じ間隔で開いている。これらの５個の穴が、分離識別できるかで分解能を定量化することができる。実際の評価では、画像の雑音量を評価し、その雑音量とＭＴＦ特性から分離識別可能な穴径を算出（解析値とよぶ）。この解析値よりも大きな穴径で、最も小さいものが実際に分離識別できているかを確認した。

第 3 世代撮影方式で撮影視野：Φ３００ｍｍの場合、ステンレス材のときの画像雑音量は、３シグマ雑音量で約３９％であった。この雑音量のときの空間分解能をＭＴＦ特性から算出すると０．２７ｍｍとなる。実際にＣＴ画像では穴径０．３ｍｍが分離識別できていた。同様にアルミ材のときの画像雑音量は、３シグマ雑音量で約２９％であった（図８参照）。この雑音量のときの空間分解能をＭＴＦ特性から算出すると０．２４ｍｍとなる。実際にＣＴ画像では穴径０．３ｍｍが分離識別できていた。またアクリル材のときの画像雑音量は、３シグマ雑音量で約３８％であった。この雑音量のときの空間分解能をＭＴＦ特性から算出すると０．２７ｍｍとなる。実際にＣＴ画像では穴径０．３ｍｍが分離識別できていた。

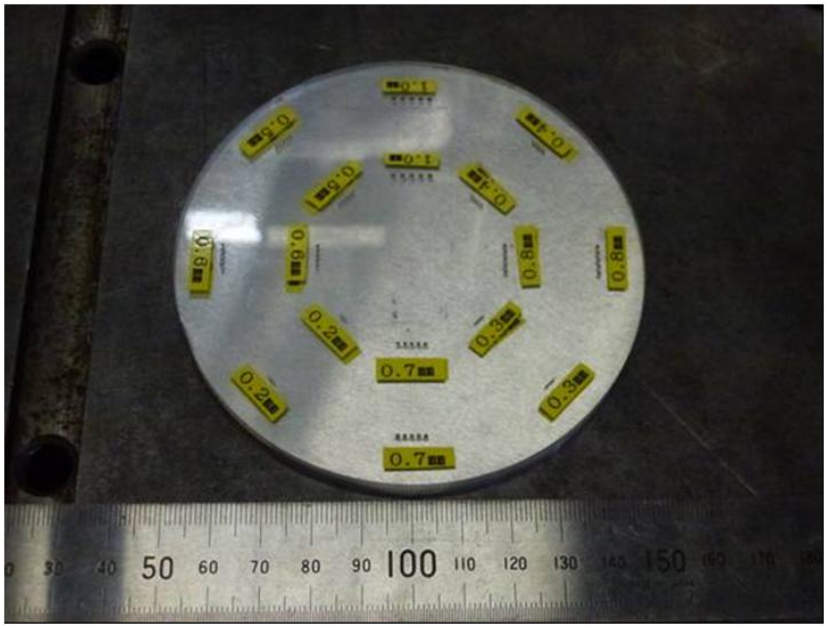

図7　穴あき試験片の画像

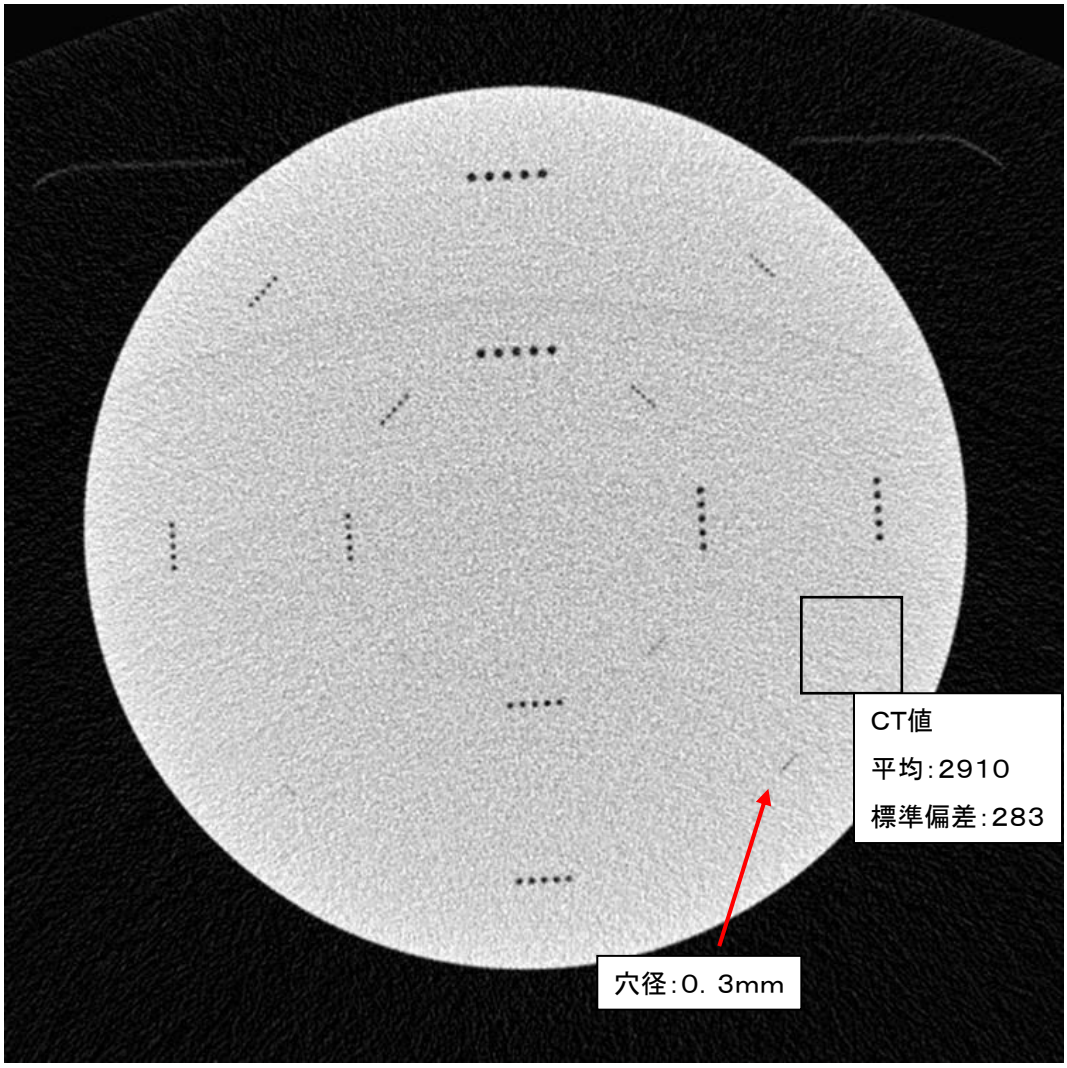

図８　穴あき試験片（アルミ材）の第 3 世代撮影方式の CT 画像

ＨｉＢｒｉｄ撮影方式で撮影視野：Φ３００mmの場合、ステンレス材のときの画像雑音量は、３シグマ雑音量で約７１%であった。この雑音量のときの空間分解能をＭＴＦ特性から算出すると０．２３mmとなる。実際にＣＴ画像では穴径０．３mmが分離識別できていた。アルミ材のときの画像雑音量は、３シグマ雑音量で約５６%であった（図９参照）。この雑音量のときの空間分解能をＭＴＦ特性から算出すると０．１６mmとなる。実際にＣＴ画像では穴径０．２mmが分離識別できていた。アクリル材のときの画像雑音量は、３シグマ雑音量で約７３%であった。この雑音量のときの空間分解能をＭＴＦ特性から算出すると０．２３mmとなる。実際にＣＴ画像では穴径０．２mmが分離識別できていた。

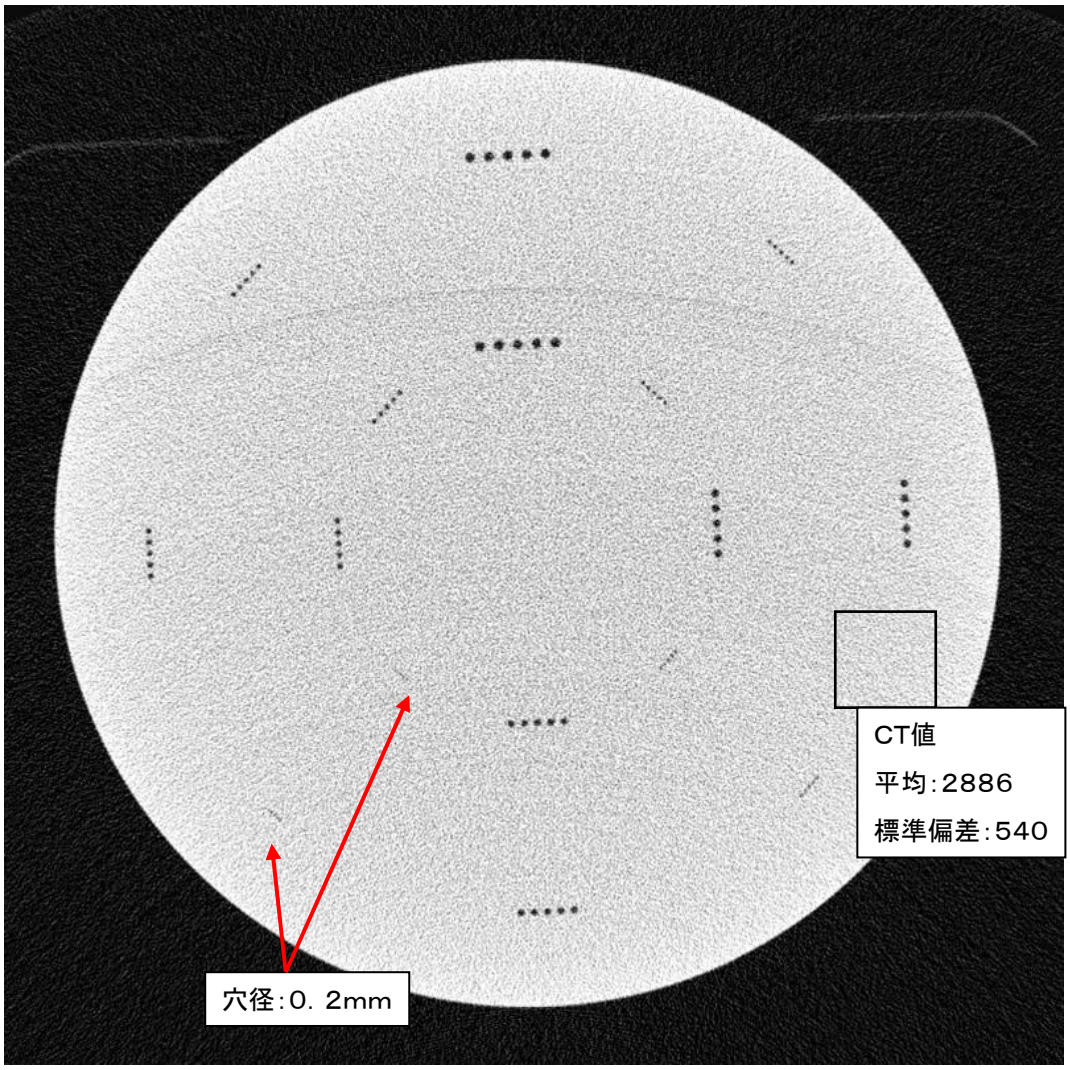

図９　穴あき試験片（アルミ材）の HiBrid 撮影方式の CT 画像

〈高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の性能評価〉

産総研にて開発した高エネルギーＸ線ＣＴ用分解能評価ゲージを適用して検証した（図１０参照）。

分解能評価ゲージは、厚さｔ（mm）の板を複数枚並列して並べたもので、板と板のすき間もｔ（m

m）となっている。このゲージでは、板厚０．０５mmから０．５mmまで、０．０５mmピッチで１０種類のゲージが並んでいる。このゲージをＣＴ撮像し、どこまでの板厚が分離識別できるかを評価した。板の材質は、ステンレス製、モリブデン製、タングステン製の三種類ある。ステンレス製　第３世代撮影方式、撮影視野：Φ３００mmの場合、０．２mm厚さの板の分解表示が可能であった。以下、モリブデン製　タングステン製についても同様の結果であった。ステンレス製　ＨｉＢｒｉｄ撮影方式、撮影視野：Φ３００mmの場合には、０．１mm厚さの板の分解表示が可能であった（図１１ａ、図１１ｂ参照）。以下、モリブデン製とタングステン製では０．１５mm厚さの板の分解表示が可能であり、０．１０mm厚さの板の分解表示は微妙なところであった。撮影視野が３００mmと大きい条件で、０．１mmの空間分解能を確認できたことは本開発装置の性能の高さを証明するものである。

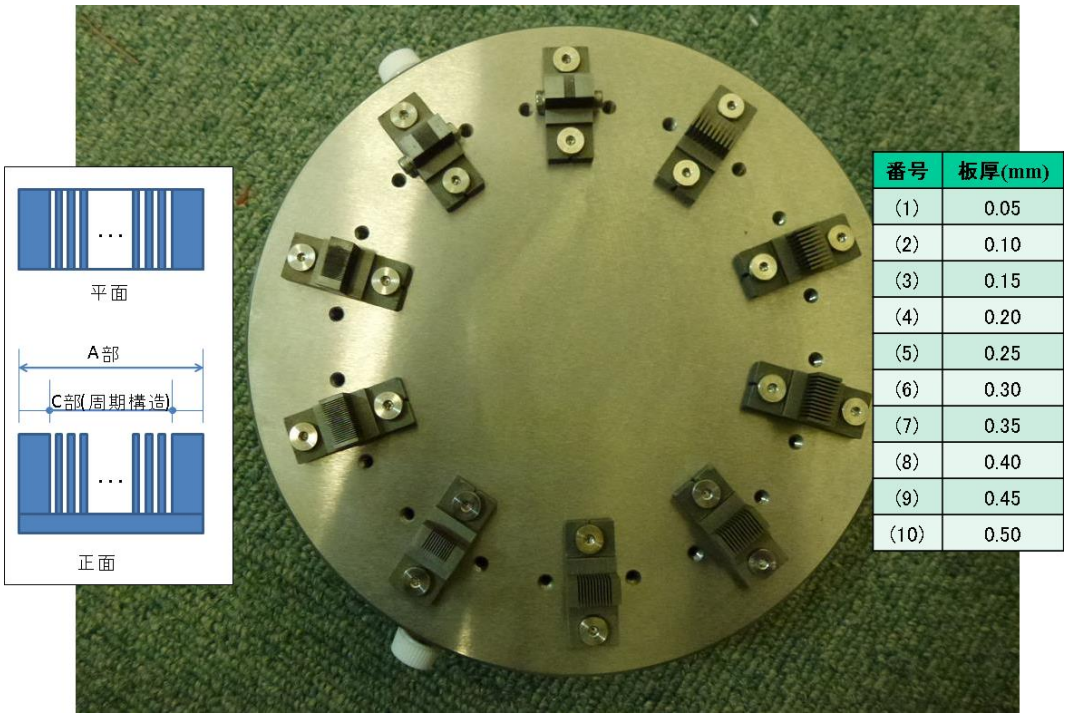

図１０　分解能評価ゲージの外観写真（ステンレス製）

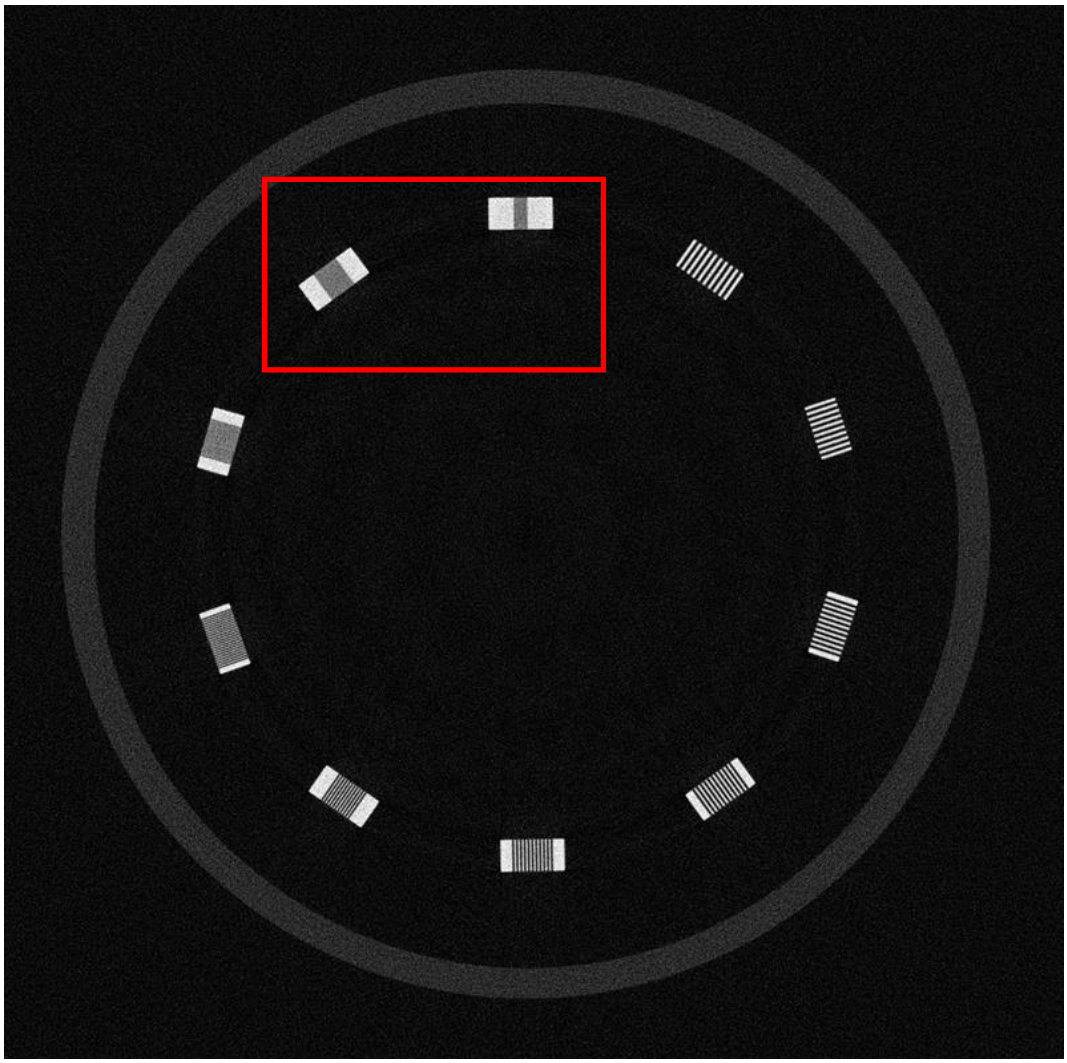

図１１ａ　ステンレス製分解能評価ゲージの CT 画像（FOV：Φ300、　ＨｉＢｒｉｄ撮影方式）

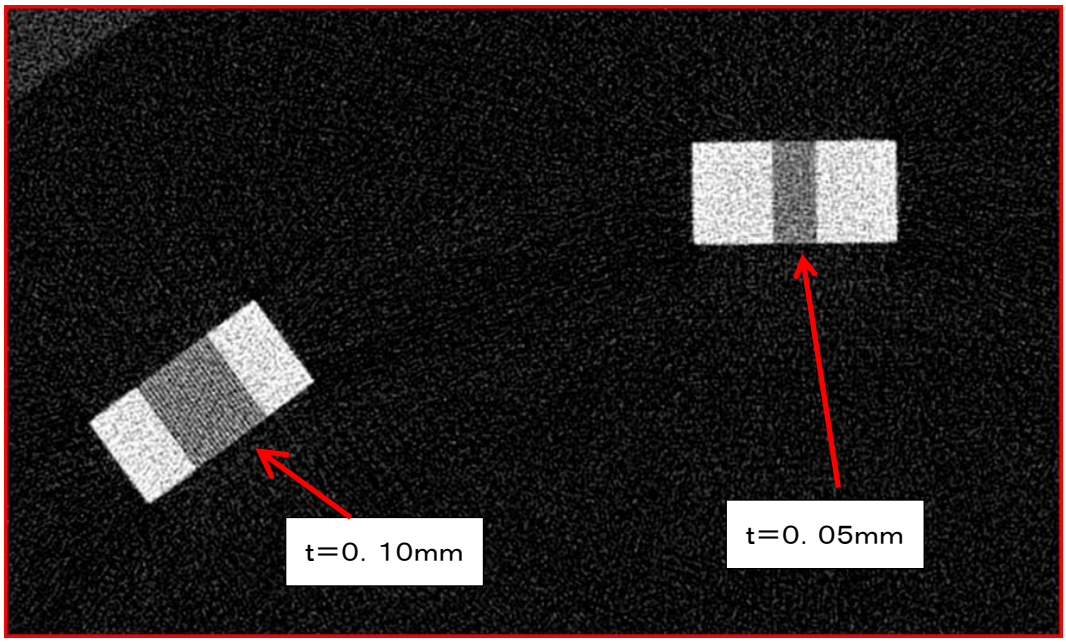

図１１ｂ　図１１ａの赤枠部の拡大図

すき間評価ゲージは、大小二つの円柱を変心した状態でくみ上げ、その間にできるすき間を観察するものである。今回測定したすき間は、０．０５ｍｍとなるように、大小円柱を変心している。ＣＴ撮像試験を実施したすき間ゲージの材質は、アルミ製とタングステン製である。また、このアルミ製の評価ゲージでは、外側にＸ線透過厚さを変えるための同心円ゲージも設置できる。さらに、全体形状を四角形とする外側ゲージも設置可能である。全体形状を四角形とする外側ゲージを取り付けたときの透過厚さは４０ｃｍになる。本開発装置では、この大きさの透過厚さに対しても良好な画像を得ることができた（図１２、図１３参照）。

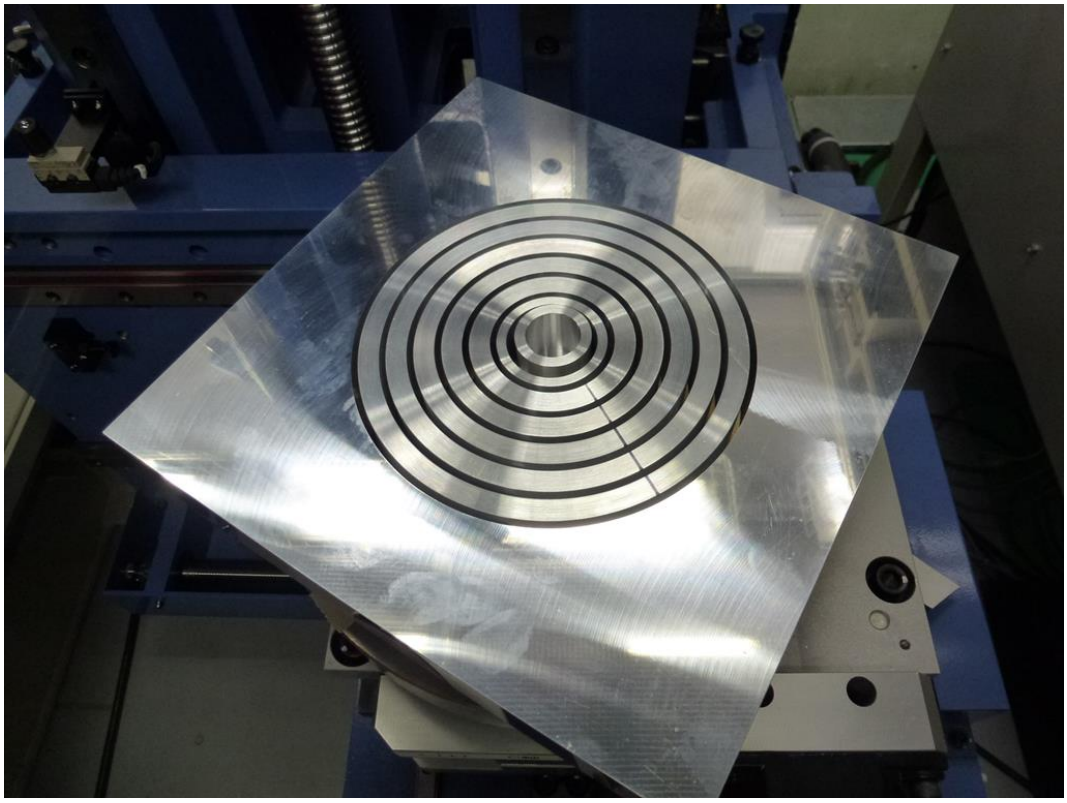

図１２　アルミ製すき間ゲージフルセットの外観写真

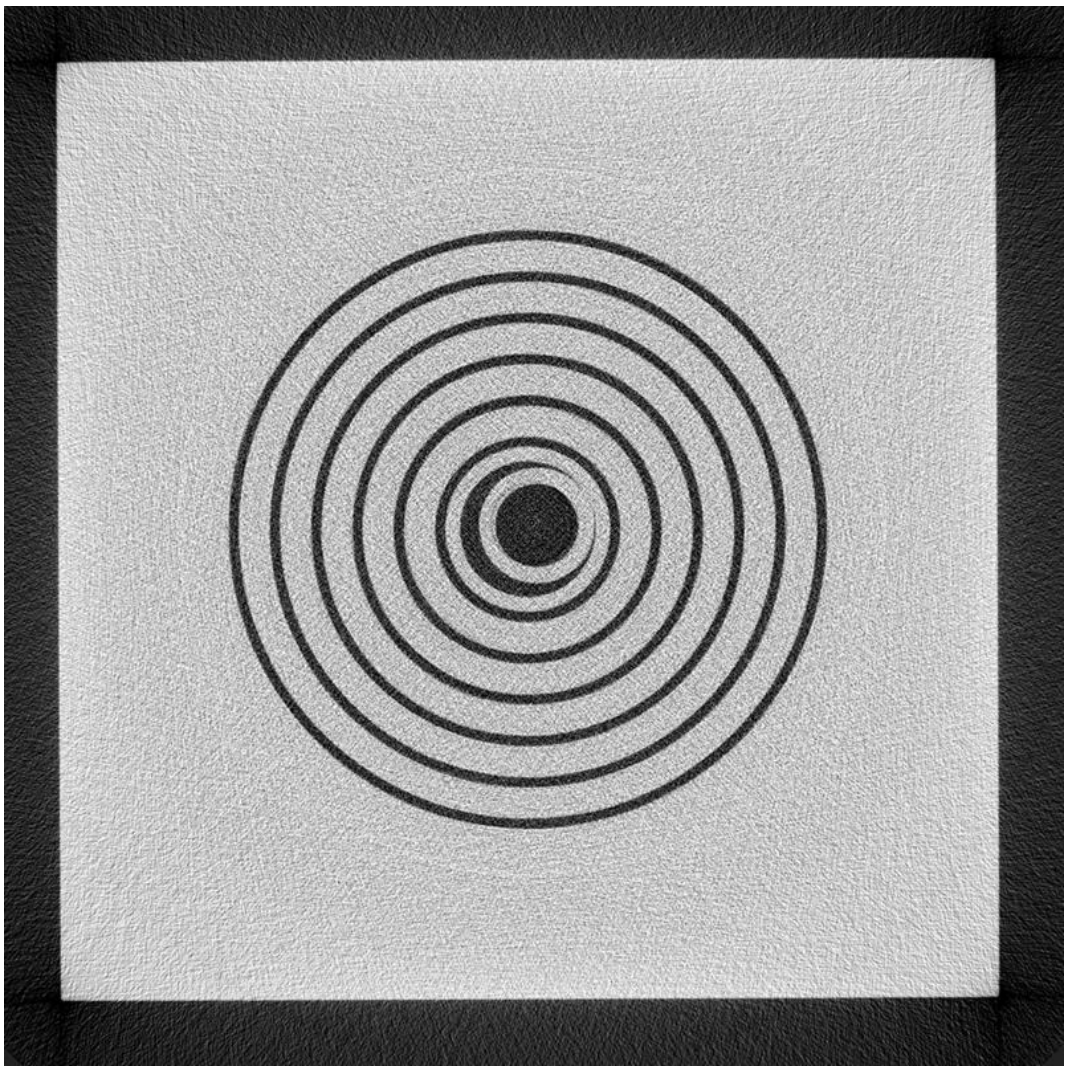

図１３　すき間評価ゲージ、同心円ゲージ、外側ゲージをつけたときの CT 画像

（２）事業アウトプット

事業アウトプット指標
25 年度
① 高エネルギー・微小 X 線源の開発
② 高分解能・高感度検出器の開発
③ 高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの開発
26 年度
① 高エネルギー・微小Ｘ線源の開発
② 高分解能・高感度検出器の開発
③ 高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの開発
④ ＣＴ装置のシステムの開発
27 年度
⑤ 高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の整備
⑥ 高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の性能評価

指標目標値（計画及び実績）		
終了時評価時（27 年度）	計画： ① 微小焦点サイズをもつ X 線源に適した装置とそのターゲットを開発する。目標焦点サイズは 100 μｍとする。	実績： ① 株式会社光子発生技術研究所の持っているＸ線源技術を使い、高エネルギー・高精度Ｘ線ＣＴ装置用の新しいＸ線源として開発製作を実施した。開発したＸ線源は、焦点サイズ 100μｍ、最大Ｘ線エネルギー3.5MV である。（達成）
	② 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。	② 検出器の薄型化開発を実施し、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持つ検出コリメータ、及び検出器ホルダを開発した。（達成）
	③ 寸法で５００ｍｍ以上、質量４０ｋｇ以上の産業用部品の撮影に対応可能かつ、高精度な（回転軸ぶれ及び回転角度の読み取り誤差について）ワークステージを開発する。	③ 高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージとして、最大寸王 600ｍｍ、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。（達成）
	④ 運転計画装置、画像表示装置、画像再構成ソフトウエア、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	④ 運転計画装置、画像表示装置、画像再構成ソフトウエア、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。	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。（達成）
	⑤ 高エネルギー微細Ｘ線源、高分解能・高感度検出器、高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージを使い、高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置として運転計画ソフトウェア及び画像表示ソフトウェアによる制御機能の組み込みを行い、さらにシステム全体の組み立て及び調整を経て高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置として完成させる。その際、Ｘ線源用ファンビームコリメータ及び検出器用スライス可変コリメータの製作及び装置への組み込みを行い、これらの高分解能化への寄与を検証する。本事業は空間周波数表示したＭＴＦ（変調伝達関数）として２．５ mm-1 の実現を目指す。	⑤ 高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置を組み上げ、試験調整を実施し、装置として完成した。空間周波数表示したＭＴＦ（変調伝達関数）では２．６mm-1 を実現した。（達成）
	⑥ 開発した高エネルギー・高分解能Ｘ線ＣＴ装置の性能評価を実施する。 分解能の性能評価に際し、平成２５年度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:０．０５ mmから５ mm）を適用して検証する。	⑥ 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。特に空間分解能については高エネルギーＸ線 CT 用分解能評価ゲージを用いて、撮影視野３００mmにおいて０．１mmの分解能を確認した。（達成）

＜共通指標実績＞

論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	国際標準への寄与	プロトタイプの作成
－	－	－	－	－	－	1

２） ３次元内外計測の評価技術の開発

（１）研究開発内容

〈分解能評価用ゲージの製作及び X 線 CT 装置の分解能の評価〉

計測用 X 線 CT の測定誤差要因は多数に渡るが、その中でも分解能に関する性能は計測用のみならず非破壊検査用の装置においても重要な指標と認識されている。高エネルギーX 線 CT の分解能を評価するにあたり、その評価すべき長さの範囲を検討した。MeV クラスの X 線源をもつ既存の高エネルギーX 線 CT は線形加速器を用いた X 線源を採用しており、その線源サイズは 1 mm 程度と言われる。一方、本事業で開発予定の高精細 X 線源は 100 μm オーダの焦点サイズを目標としている。そこで、分解能評価用ゲージの代表寸法を分解能ゲージの周期構造部の板厚で代表することとし、代表寸法を 0.05 ～5 mm とすることとした。分解能評価用ゲージの具体的な構造について、金属と空気をライン・アンド・スペースに対応付ける周期構造を採用した。分解能の評価に使用できる領域は、高エネルギーX 線 CT では主流となっているファンビーム CT に対応できるよう、5×5 mm の断面を有するものとした。この金属と空気の組み合わせによる開放型の構造は、接触式座標測定機や接触式ナノ座標測定機などを用いてライン・アンド・スペースの寸法の校正を可能とする特徴があり、この特徴を活かした校正を行っている。

分解能評価用ゲージを高エネルギーX 線 CT 装置に設置して撮像を行い、続いて再構成演算を行ったボリュームデータを表示することによって、周期構造部の明暗の繰り返し構造を再現できているかどうかにより、目視での簡便な分解能の確認を行うことができた。

X 線 CT の再構成ボリュームデータの分解能の定量的な評価を行うため、周期構造部で得られた相対輝度値の分布を用いて分解能を評価する簡便な方法を提案した。これは、再構成ボリュームデータの周期構造部での相対輝度値の差が減衰する傾向を定量化するものである。定量化の指標としては幾つかの考え方がある。ただし高エネルギーX 線 CT 装置の空間周波数に対する応答、あるいは再構成ソフトウェアや面貼りアルゴリズムの空間周波数に対する応答を現状ではブラックボックスとして取り扱う必要があると考えられるので、これらの系を最も単純な一次遅れ系と見なして検討を進めた。具体的には一次遅れ系の単位ステップ応答の時定数として単純なモデル化を行い、系の時定数は単位ステップ応答の 0.632 倍となる空間周波数を応答限界として採用することとした。

提案した評価方法を、リニアックを X 線源とした既存の高エネルギーX 線 CT 装置に適用したところ、分解能は 0.7 mm となった（図 14、図 15）。

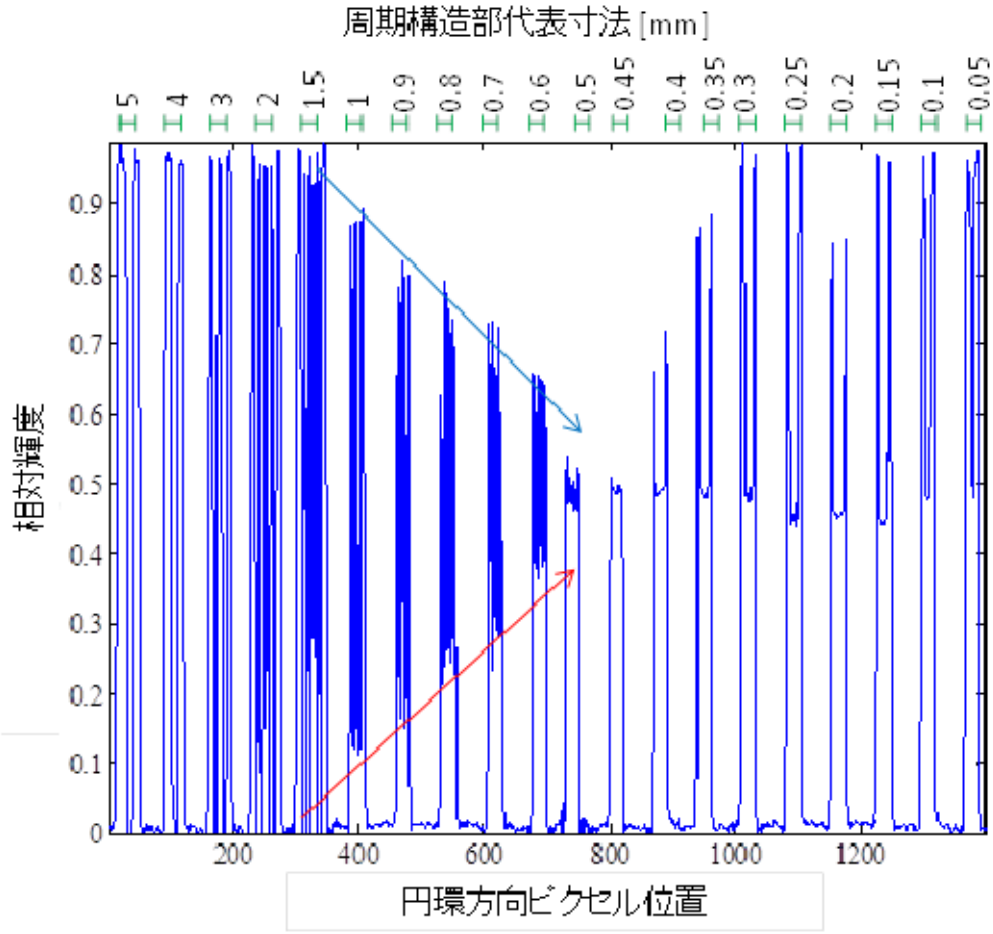

図 14　　周期構造部の円環方向ピクセル位置における相対輝度値

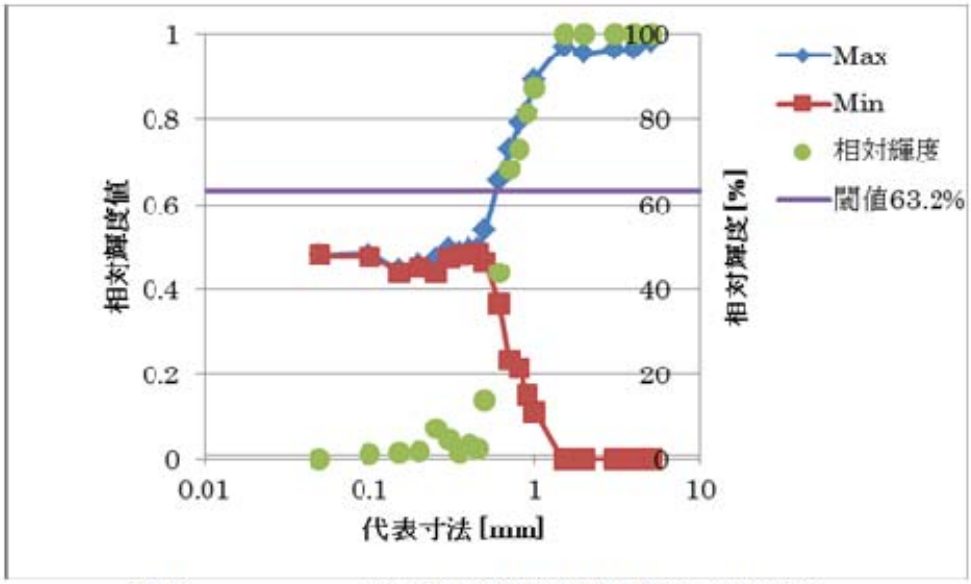

図 15　　タングステン製分解能評価用ゲージにおいて、
一次遅れ系の時定数として分解能を評価した結果

続いて本研究により開発した高エネルギー高分解能 X 線 CT 装置に適用したところ、0.1 mm／0.1 mm のライン・アンド・スペースを解像することができた。この性能は、撮像視野Φ300 mm において 0.1 mm の分解能をもつことを示しており、MeV クラスのエネルギーをもつ既存の高エネルギーX 線 CT の中では、世界的に極めて突出した高い性能を有していることを支持している。

なお、マイクロメータサイズの X 線源を採用し、撮像倍率が高い条件下ではマイクロメートルオーダの分解能を発揮し得る既存のマイクロフォーカス X 線 CT 装置がある。ただし、製作した分解能評価ゲージは撮像に要する寸法が約Φ110 mm となっており、このような低倍率の撮像条件では X 線源ではなく、X 線検出器の分解能が支配的に装置の分解能を決定することが知られている。実験的に産総研が保有するマイクロフォーカス X 線 CT 装置に、本研究で製作した分解能評価用ゲージを適用した結果、その分解能は 0.4 ㎜ であった。Φ100 ㎜ を越えるような、X 線 CT 装置にとっては比較的低倍率の撮像・測定を行う場合、本研究により開発した高エネルギー高分解能 X 線 CT 装置はマイクロフォーカス X 線 CT 装置を越える性能を発揮していることになる。

〈寸法測定精度の評価用ゲージの開発〉

計測用 X 線 CT の精度評価の枠組みは、ISO 国際標準化のプロジェクトとして ISO/TC213/WG10 において後述するように審議が行われている。ISO 国際標準の枠組みは、座標測定機の測定空間内のグローバルな測定誤差を代表する「長さ測定誤差」、及び局所的な測定誤差を代表する「プロービング誤差」について幾何学的な測定誤差の評価を行うことが標準化される見込みである。

長さの測定器として最も基本的な性能指標と位置づけられる、長さ測定誤差の検証は、予めその寸法について校正された検査用の長さを参照して行う。寸法測定精度の評価用ゲージの形状として、スタイラスフォレスト型のゲージと、ホールプレート型のゲージの 2 種類が ISO 国際標準化の審議において候補に挙げられている。ホールプレート型のゲージはドイツが採用を主張するゲージであるが、寸法測定に供する形体である円筒穴の配置が二次元であることなどにより否定的な意見もある。物質透過の影響をほぼ受けない場合の寸法測定精度を評価するゲージとしてスタイラスフォレストを、また物質透過の影響を受ける場合の寸法測定精度を評価するゲージとしてステップシリンダを、それぞれ適用する考え方もあるため、物質透過の影響の大小のそれぞれの場合について寸法測定精度を評価し得る特徴を重視し、スタイラスフォレストとホールプレートの組み合わせによる寸法測定精度評価用ゲージを試作することとした。

スタイラスフォレストゲージの測定部は、シャフト構造の先端に固定された球の表面である。その球の固定は通常接着工程が採用される。そのため、スタイラスフォレストゲージの事前の校正等を接触式座標測定機および幾何誤差評価用段差寸法ゲージを用いて実施する際の剛性、特に接着部の強度を優先し、球の支持部にはステンレス系の金属材料を使用して機械加工の後取り付けることが多かった。ところがこの構造では撮像時に、測定部となる球の比重（約3）の 2 倍以上の比重をもつステンレス鋼の構造が測定部のごく近傍に位置することとなり、X 線 CT 装置の寸法測定精度の評価に供するゲージとして最適化されているとは言いがたい。そこで、測定部となる球の支持部について、炭素系複合材（比重 約 1.5）を使用し、接着によって球と支持部とを接合する構造を採用した。

本研究により開発した高エネルギー高分解能 X 線 CT 装置に対し、スタイラスフォレストの測定部と物理的重なり合うようにホールプレートを組み合わせて設置して撮像を行った。撮像結果にはホールプレートによる線質硬化の影響は見られなかった。少なくとも MeV クラスの高エネルギーX 線 CT 装置の長さ測定

性能評価において、ホールプレートを採用するメリットは線質硬化の影響の抽出という点において明瞭でないことを実験的に確認した（図 16、図 17）。

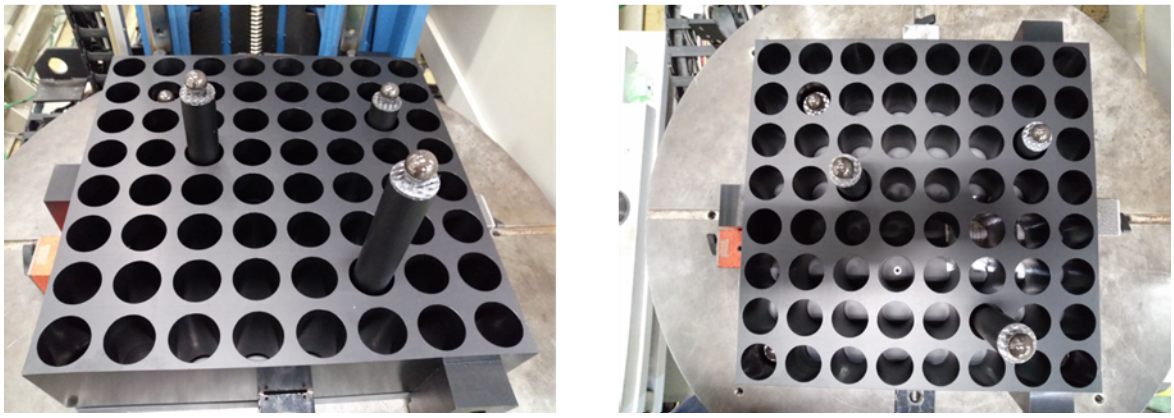

図 16　アルミ製のフォレストゲージ用天板と CFRP ボールシャフトフォレストゲージ

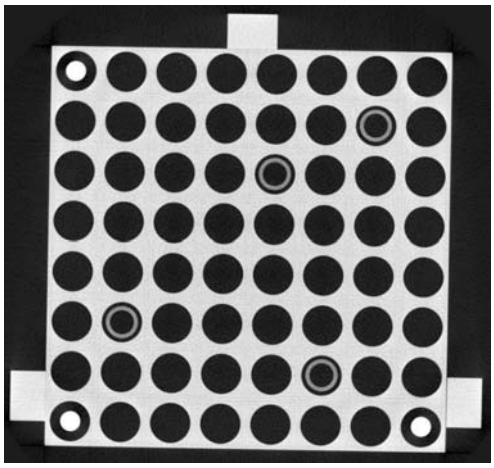

図 17 アルミ製のフォレストゲージ用天板と CFRP ボールシャフトフォレストゲージの撮像イメージ

測定対象物及びその近傍の X 線減弱率を 3 次元的にプロットしたイメージとして X 線 CT 装置の再構成画像が得られる。密度の異なる材質の境界近傍では X 線減弱率が急激に変化するため、この性質を利用して測定対象物の輪郭を求めることができる。その際、二つの材質の密度差が十分に大きければ原理的にはシャープに境界を決定することができる。一方、二つの材質の密度差が相対的に小さい場合、鮮明な境界を決めることは困難になる。特に撮像した画像に含まれるノイズレベルの影響を強く受ける。密度差が小さくコントラストの低い場合にどの程度鮮明に境界を決定することができるかの指標はコントラスト分解能と呼ばれ、その検証を行った。

密度差を制御する方法として、例えば円筒形状の凸ブロックを、これと同じ直径の円筒穴の開いた凹ブロックに挿入し、コントラストの管理された器物を実現する方法がある。ただしこの場合、凸ブロックと凹ブロックの間の寸法公差及び形状偏差について、評価対象となる X 線 CT 装置の分解能に関する能力に比べて無視できる程度に良好な品質にする必要がある。あるいは凹ブロックの円筒穴に密度を調整した造影剤などを注入し、コントラストの管理された器物を製作する方法も提案されている。これらはいずれも医療用 X 線 CT 装置を対象とした器物であり、産業用 X 線 CT を適用する測定対象物の密度の範囲とは一致しておらず、また適した密度範囲における低コントラストの状態を実現することも想定されていない。

産業用 X 線 CT に適した低コントラスト分解能の評価を行うための器物を設計・試作した。円筒部の直径

については、高エネルギーX 線 CT 装置の分解能を考慮し、Φ0.5 mm、Φ1.0 mm、Φ2.0 mm、Φ5.0 mm 及びΦ10.0 mm の 5 水準とした。また円筒部の材質の密度として、ポリエチレン(0.95) 、ポリフェニレンサルファイド (1.35)、窒化ホウ素(2.1)、マコール(2.52)、アルミニウム(2.8)、及びチタン(4.5)の 6 水準を設定した。

一方、これらの円筒部の密度との間でコントラストをつくる媒質を選定するにあたり、媒質の密度を所望の数値に調整できる重液の採用を検討した。これまでに使用されている重液には、医療用に用いられる造影剤を希釈するものを除外するとほとんどのものが取扱いにおいて毒性又は危険性を有しており、容易な取扱い条件のもとで採用することは難しい。唯一、ポリタングステン酸ナトリウムだけが毒性及び危険性において明示的には指摘されていない。また、ポリタングステン酸ナトリウムの溶媒は水であり、その他の多数の組成の重液が使用する有機溶媒ではないことも取扱いの容易さの点において利点である。ただし水を溶媒として用いることの短所は、蒸発によって重液の濃度及が変動しやすいことであると考えられる。そこでポリタングステン酸ナトリウムと純水を混合して重液を調整した後、コントラスト分解能ゲージとして X 線 CT 装置での撮像を行う前に表示機能付き密度計を用いて重液の密度の確認を行うこととした。これにより重液の密度が所望の数値に対して一定の範囲に入っているかどうかを確認することにより、重液の密度 1.0 から約 3 までの範囲で任意に管理することができた。

コントラスト分解能ゲージの開発により、密度 0.95 から 4.5 の間の円筒形状器物に対し、その周囲の媒質の密度を 1.0～約 3 まで連続して可変可能とすることにより、3.5～約マイナス 2 の密度差を円筒形状器物と媒質の間で設定し、実際に X 線 CT による撮像を実現することができた（図 18、表 1、図 19、図 20）。

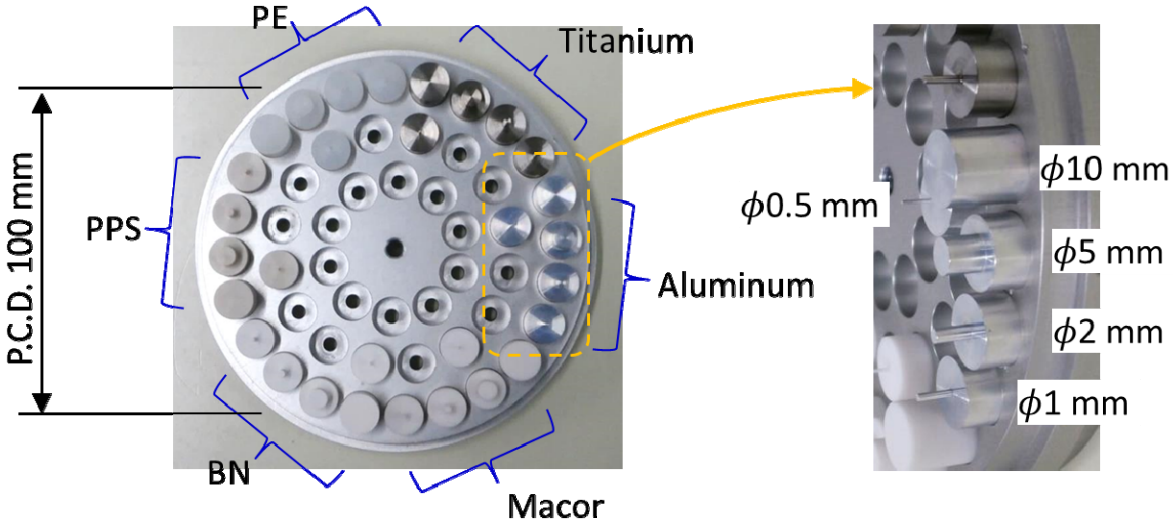

図 18　コントラスト分解能ゲージの外観

表1 コントラスト分解能ゲージの代表諸元

item	Specification
Size of cylindrical feature in diameter [mm]	ϕ0.5,ϕ1.0,ϕ2.0,ϕ5.0, and ϕ10.0
Material of cylindrical feature (density [g/cm^3])	Polyethylene (PE) (0.96) Polyphenylenesulfide (PPS) (1.35) Boron Nitride (BN) (2.1) Macor (2.52) Aluminum (Al) (2.8) Titanium (Ti) (4.5)
Material of liquid medium (density [g/cm^3])	Sodium Poly Tungstate (SPT) (1～3.1)

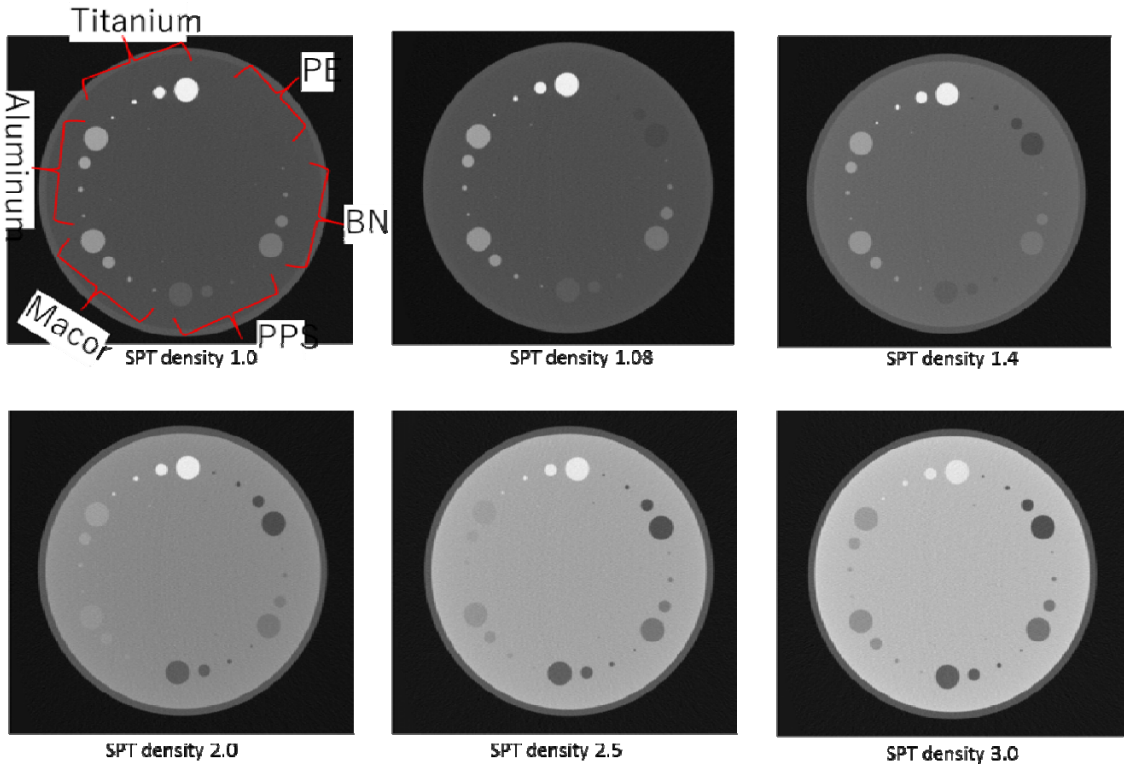

図 19　SPT 重液の密度毎のコントラスト分解能ゲージの撮像イメージ

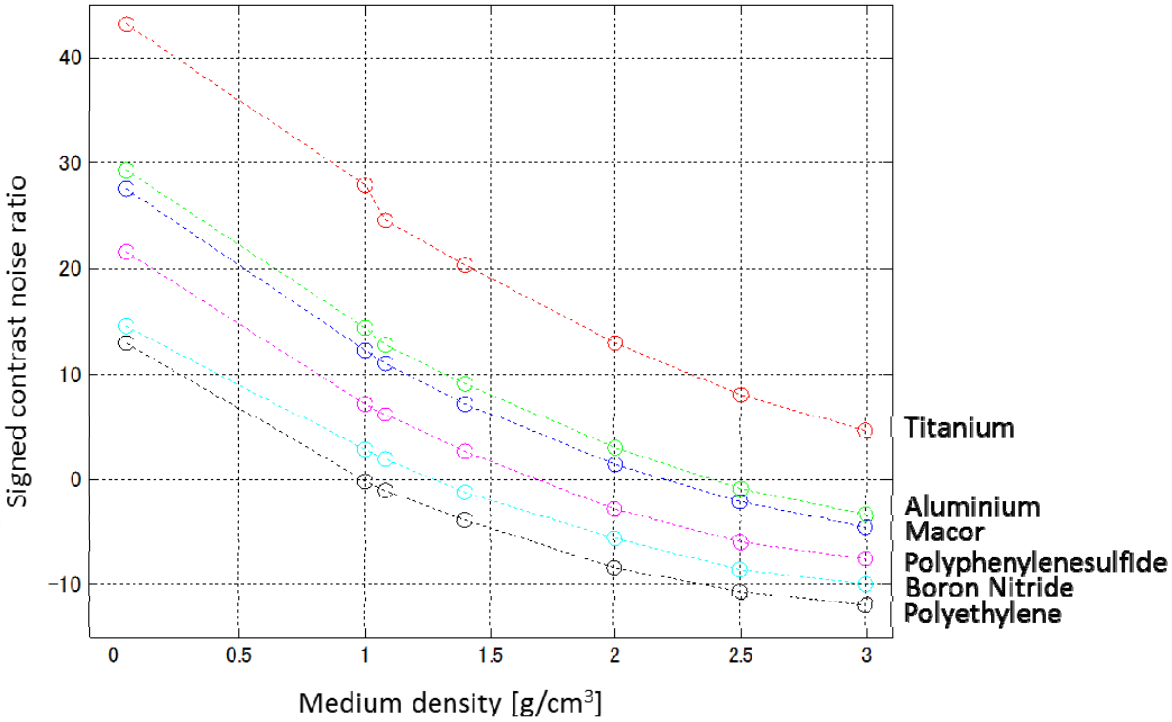

図 20　符号付きコントラストノイズ比(SCNR)の SPT 密度の変化による変動

〈画像再構成技術の開発〉

大規模な画像の再構成に必要な技術として、四分木による画像データ（図 21）上に、対象物の形状に応じて適応的に空間を分割し、逐次再構成を行う方法を開発した。手法はトップダウン的に、最大の四角形領域（画像再構成の最大領域）からはじめ、それを再帰的に再分割するものである。本手法の特徴としては、再分割の判定を、領域の CT 値を積分し面積で割った値（平均 CT 値）で行い、さらに、この平均 CT 値をバックプロジェクションで高速に計算するという方法を考案した。これらをプログラムとして実装し、投影データに適用することによって計算実験を行い、画像品質及び計算時間の点からの評価により本手法の有効性を確認した。

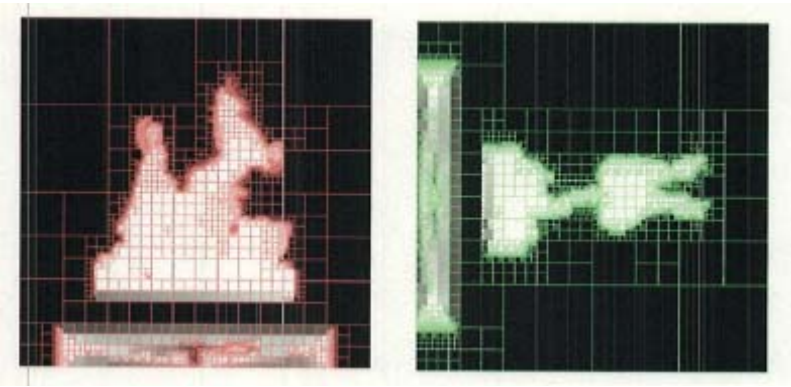

図 21　4分木による画像の例

本研究では、親領域を分割するかどうかを判定する方法について新しい方法を考案した。まず、親領域の CT 値を積分し面積で割った値（平均 CT 値と呼ぶ）を求める。さらに、親領域を２×２、あるいは4x4の四

角形領域（子領域と呼ぶ）に分割し、それぞれの子領域の平均 CT 値を求める。もし、親領域が均一な CT 値で満たされていれば、子領域の平均 CT 値のばらつきは小さいはずである。逆に、親領域の中に境界がある場合は、ばらつきは大きくなるので、このようなばらつきを計算し、それが大きい場合は分割し、小さい場合は分割を終了する。これを再帰的に繰り返すことによって、四分木を構成する方法を開発した。

また、当該領域における平均 CT 値を計算するために領域内の画素の CT 値をすべて計算してしまうと総当たりを計算することになりトップダウンのメリットがなくなる。そこで本研究では比較的高速で品質の良い画像が得られる FBP(Filtered Back Projection)を基本とし、FBP に基づいて平均 CT 値をバックプロジェクションで計算する方法を考案した。

以上のアルゴリズムに基づき試作ソフトウェアを作成し、ボトムアップ法との比較などを行った。評価対象の形状に依存して、細かい突起の部分に関しては本手法での再現性に限界の生じることがあるものの、計算時間については平均的にボトムアップが 10 秒程度だったことと比較し、本手法は 1 秒程度と大幅な高速化が達成された。

〈画像活用のソフトウェア類の開発〉

本プロジェクトで開発される高エネルギーCT 装置に搭載される X 線検出器は素子の稠密化による多チャンネル化のため、入力となるサイノグラムが高解像度化される。そのため、通常のボクセルモデルによる CT 再構成法を適用した場合には、莫大な計算量及び計算領域が必要となる。そこで、実用的な計算コストで高性能な CT 再構成を可能とするソフトウェアを製作した。

CT 再構成法には、逐次再構成法の一種である OS-CONVEX 法を用いた。逐次再構成の手順は、下記の手順①~③を繰り返すことにより行う。

① 計算中の CT 画像に対して、X 線透過量を順投影（フォワードプロジェクション）により計算、
② 計算により得られた X 線の透過量と実測の透過量の差分を計算、
③ ある検出器に対応する画素を逆投影（バックワードプロジェクション）により算出し、計算と実測の差分が小さくなるように画像の CT 値を修正。

上記の手順における CT 再構成を行う場合、一般に正方形（2 次元の場合）、あるいは直方体（3 次元の場合）を均一に分割した直交格子が用いられるが、本開発では計算コスト低減と高精細な再構成を実現するために適合的な空間分割を用いた。空間分割法には、2 次元の場合には 4 分木、3 次元の場合には 8 分木を用いることとした。前年度までにコーンビーム型 CT 装置を想定して 8 分木を用いた手順①を行うソフトウェア（X 線の透過シミュレータ）は開発済みであったため、本開発ではこれを保有技術として活用し、開発効率を最適化した CT 再構成ソフトウェアの製作を行った。本製作においては、手順③のバックワードプロジェクション機能を実装することを中心的な作業とし、それを組み込んだ逐次再構成機能全体を実装することにより、目的とする CT 再構成機能が実現した。

CT 再構成法はスキャン形式により異なるが、開発したソフトウェアは様々な形式に対応するために、下記の 3 つの形式での CT 再構成が可能である。

- 2 次元 CT: パラレルビーム形式
- 3 次元 CT: パラレルビーム形式
- 3 次元 CT: コーンビーム形式

従来のボクセルモデルによる均一な空間分割と、新たに製作した適合的な空間分割（八分木）による逐次的 CT 再構成との比較をアルミブロック（サイズは 10×30×50 mm）により行った。コーンビーム CT 撮像により得られたサイノグラムは 728×920 ピクセルの画像が 800 枚である。適合的空間分割を用いたことにより、物体境界付近の分解能を高く維持しつつ、CT 再構成の速度向上とデータ節約に成功した。この例においては、計算速度は約 4.8 倍、データ量は約 140 分の 1 となっている。

〈内部寸法計測の信頼性を評価する手法の開発〉

X 線 CT 装置の長さ測定誤差の検証に適用可能な既存のゲージと同等の寸法の評価に対応することができ、既存のゲージと比較してさらに短い寸法についても対応することが可能なゲージを提案した。このゲージは径の異なるふたつの中空円筒を用いたもので、一方の円筒を他方の円筒の内側に、互いの円筒軸が平行となるように、ただし偏心させて設置、固定する構造を基本としている。このとき、偏心量について調整が可能な調整機構をもっている。外側の中空円筒と内側の中空円筒との間の空隙について、例えば 0.05 mm となるように偏心量を調整することができる。外側の中空円筒は外径Φ50 mm、内径Φ41 mm、また内側の中空円筒は外径Φ35 mm、内径Φ25 mm である。材質はアルミ、チタン、鋼、およびタングステンとした。

前節に記載の偏心中空 2 重円筒によるゲージの外形はΦ50 mm であり、MeV 級の高エネルギーX 線 CT の透過力に対し、十分に大きな寸法を有しているとはいえない。そこで、複数の異なる直径の中空円筒を偏心中空 2 重円筒の外側に同心円状に設置することにより X 線の透過距離を増大し、最大外径Φ200 mm にいたる 6 段階の外径を実現可能な構造を採用した。さらにアルミ材質の場合には、1 辺の寸法が 284 mm となる正方形の外殻方形部を設け、最大透過距離が 400 mm を越えるように寸法の決定を行った。

試作した内部寸法計測ゲージを高エネルギーX 線 CT 装置に適用して撮像結果を得た。ここで偏心円筒の間隔の狭い部分を 0.05 mm に調整したため、また間隔の広い部分は 5.95 mm となる。CT 値画像を目視で観察すると 0.05 mm のギャップを解像できている。

〈再構成における表面抽出の高精度化技術開発〉

産業用 X 線 CT に広く利用される再構成アルゴリズムに、フィルタ補正逆投影法（FBP 法）がある。この方法は十分な数の投影数が確保でき、透過画像に含まれるノイズ成分が相対的に小さいときに効率的に動作するとされる。また、何よりも再構成演算に要する計算コストが低い特徴がある。一方、医療用 X 線 CT での利用が多いとされる逐次再構成法は FBP 法とは逆に、投影数が必ずしも十分とはいえない場合や、透過画像に含まれるノイズ成分が相対的に大きい場合に良好な再構成結果を得ることができるとされる。反面、再構成演算に要する計算コストは高い課題がある。

高エネルギー・高精細 X 線 CT は撮像可能な最大寸法と分解能の比が大きく、広ダイナミックレンジな特徴がある。このとき、検出器の画素数が増加するため、検出器の信号対雑音比は低下することになる。また、装置開発において採用した小型リング加速器による X 線源は、既存高エネルギーX 線 CT に適用されている MeV クラスの X 線源ほどには明るくない。これらの状況から逐次再構成法に対する期待は強く、本開発課題により処理効率が高く耐雑音性能の優れた画像再構成法の開発に取り組んだ。

トップダウン方式の 4 分木による逐次再構成法を開発した。まず初期値で与えた格子間隔で再構成領域

を分割し、CT 値を求める。次に各々の格子について、更に細かい格子間隔が必要と判断されれば、ひとつの格子間隔を 4 分割し、CT 値を求める。撮像対象の形状の特徴を十分に反映するところまで 4 分割を継続し処理は終了となる。これにより、高い分解能が必要な領域には細かく、一方分解能が不要な領域には最低限の情報量で CT 値を割り振る。各格子の CT 値がもたらす検出器位置で観測される現在の投影値については順投影アルゴリズムにより、また現在の投影値の偏差を補正するように CT 値を更新することについては逆投影アルゴリズムにより、それぞれ計算が行った（図 22）。

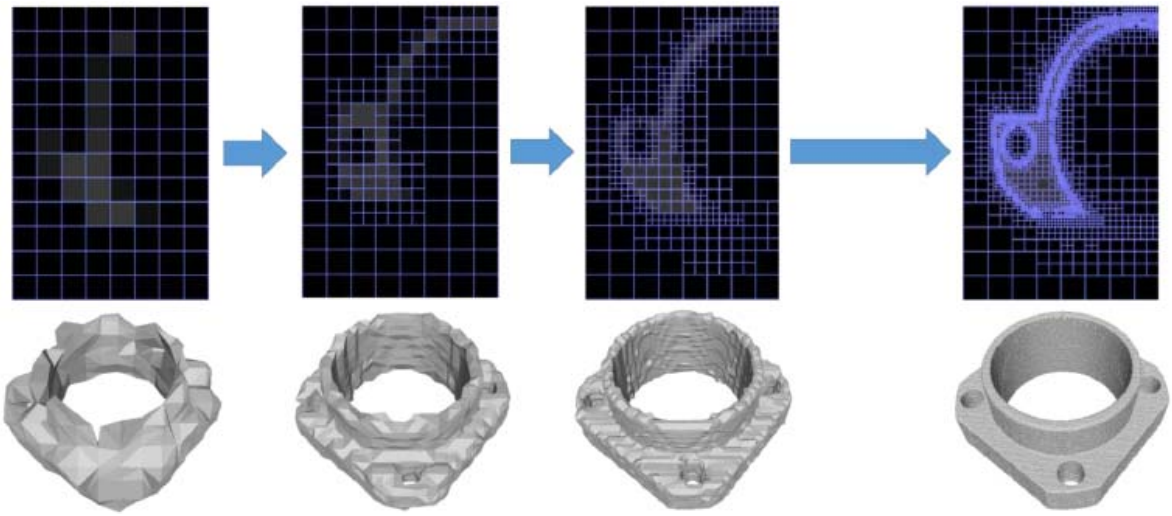

図 22　4 分木分割による適合的逐次再構成のイメージ

各格子の投影値の偏差を補正するときのモデルには加算補正（ART 法）や乗算補正（EM 法）などが提案されているが、本研究では Convex 法を採用することとした。Convex 法は再構成演算につきものの対数変換に着目し、特に透過距離が長い場合の対信号雑音比の悪化を防止する効果がある。Convex 法を採用した逐次再構成法の結果は FDK 法による再構成画像と比較すると、ノイズに対する耐性が相対的に高い結果が得られた（図 23）。

図 23　アルミ製ステップシリンダにおけるコーンビームアーチファクトの現状と低減

トップダウン方式により 4 分木分割を逐次的に行うには、分割すべきセルと分割すべきでないセルとの差別化を行う必要がある。本研究では、現段階の 4 分木セルと、もう 1 段階再分割を行った 4 分木セルとについて、再構成イメージの計算および表面性状の抽出を行い、注目するセルの表面性状に再分割の効果

が現れるかどうかにより再分割の必要性を判断するアルゴリズムを採用することにした。分割すべき 4 分木セルについて順次再分割を行い、最終的に分割すべき 4 分木セルが存在しなくなる時点で繰り返し処理を終了するアルゴリズムを実装した。

X 線 CT の再構成ボリュームイメージにおいて、異なる密度のふたつの物質間の境界を表面性状として決定するアルゴリズムの中に、Marching-Cubes 法が知られている。このアルゴリズムは方形格子状のセルの並びの格子点に実数の状態量が与えられている場合に、格子の境界のエッジ上に頂点をもつ表面メッシュを生成するものである。よって 4 分木には適用することができない。そこで、Dual Marching Cubes 法を採用することとした。このアルゴリズムは多重方形格子のセルの中心に実数の状態量が与えられている場合に、双対格子上で表面メッシュの頂点を計算する方法であり、4 分木およびその再分割による多重セル構造に適用することができる。

開発した 4 分木による逐次再構成法の効果を確認するため、従来の均一格子による逐次再構成法との比較を行った。実験対象とした透過画像は 220 kV クラスの産業用 X 線 CT において樹脂製のパイプフランジの撮像結果から得たものである。パイプフランジはパイプ内径Φ32 mm、フランジ部の外寸 42×42 mm のものである。200 枚のビュー数の透過画像の画素数は 2048×2048 であったものを 2×2 ビニング処理により 1024×1024 へと前処理により縮小した。4 分木による逐次再構成における初期値としての格子数は16×16×16である。この初期値から6回の逐次再構成計算を繰り返し、最終的な再構成結果を得た。

均一格子による従来法の場合、ボリュームデータのデータ容量は約3.1 GBとなったが、提案する4分木逐次再構成法では 26 MB へと縮小した。

〈実ＣＴデータへの適用による再構成ソフトウェア適合化開発〉

経済産業省研究開発事業「平成26年度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）」において開発した、高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージ、運転計画ソフトウェア等の開発したソフトウェアに対して、新たに開発したワークステージ駆動ソフト、計測データ重合処理ソフト、及び運転計画ソフトの開発を行った。

ワークステージ駆動ソフトは、ワークステージを駆動するための機械系の制御ソフトウェアである。平成26年度に基本部分の開発を完了しているが、今年度の開発において新たに機能を追加した。これは、X線CT装置システムとして運転するために、高エネルギー・微小X線源装置の動作特性を反映する必要があったためである。

計測データ重合処理ソフトは、検出装置で計測した検出データを加工して、再構成ソフトウェアへの入力データとするデータ処理ソフトウェアである。ただし研究期間の間にワークステージ駆動の仕様が大きく変わった等の外乱要因により、再構成ソフトウェアへの入力データの変更が必要となった。

運転計画ソフトは、X線CT装置の運転計画をオペレータがGUI（Guraphical User Interface）を用いて設定し、その設定した計画内容を、高精度・高分解能・高耐荷重ワークステージの制御系と、画像表示装置のコントローラ系へ転送してCT装置システムとしての動作を一元管理するソフトウェアである。本ソフトウェアは平成26年度に基本部分の開発を完了しているが、今年度の開発において新たにソフトウェア機能を開発した。

〈論文〉

1. Dimensional X-ray CT in Japan, development, application, and standardization. Toshiyuki Takatsuji, Makoto Abe, Hiroyuki Fujimoto. International Conference on Industrial Computed Tomography 2014, University of Applied Sciences Upper Austria - Campus Wels, Austria, February 27, 2014.
2. Hole Plate for Length Measurement with X-rayCT PTB-NMIJ, Osamu Sato, Urich Neuschaefer-Rube, Markus Bartscher, Frank Haertig, VDI Working Group Meeting, Braunschweig Germany, June 7, 2013.
3. Hiromasa Suzuki, Daiki Yamanaka, Yutaka Ohtake, Sinogram Polygonizer for Reconstructing 3D Shapes, GDM Workshop (Geometric Design facing Manufacturing) (2014)
4. Yukie Nagai, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki, Tomographic surface reconstruction from point cloud, SMI 2014 (Shape Modeling International), Computers & Graphics (2014)
5. ディメンジョナル X 線 CT の展開、藤本弘之、現物融合型エンジニアリングを実現する3Dスキャニング技術の最前線、2014 年精密工学会春季大会国内シンポジウム、東京大学本郷キャンパス、2014 年 3 月 18 日.
6. 松崎和也. 独立行政法人産業技術総合研究所調査研究報告 計測用 X 線 CT の高精度化に関する調査研究、独立行政法人産業技術総合研究所, 2015.
7. M. Abe, H. Fujimoto, O. Sato, K. Sato, and T. Takatsuji. Evaluation of resolution performance of high energy X-ray CT. Proc. icOPEN2015, 2015.
8. O. Sato, H. Fujimoto, S. Osawa, M. Abe, and T. Takatsuji. Simple Interim Check of Measuring Performance for X-Ray Computed Tomography Used as Coordinate Measuring System. Int. J. of Automation Technology, 2016.
9. M. Abe, O. Sato, and T. Takatsuji. Novel evaluation method of low contrast resolution performance of dimensional X-ray CT. Wels, Austria, 2016. Proc. 6th conference on industrial computed tomography.
10. S. Kim, A. Sakane, Y. Ohtake, H. Suzuki, Y. Nagai, K. Sato, H. Fujimoto, M. Abe, O. Sato, T. Takatsuji. Efficient Iterative CT Reconstruction on Octree Guided by Geometric Errors. 6th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2016). iCT2016, 2016.

（２）事業アウトプット

事業アウトプット指標
25 年度 ① 計測結果の信頼性を客観的に評価する手法の開発 26 年度 ② 計測結果の信頼性を客観的に評価する手法の開発 ③ 画像再構成技術の開発

④ 画像活用のソフトウェア類の開発 27 年度 ⑤ 内部寸法計測の信頼性を評価する手法の開発 ⑥ 再構成における表面抽出の高精度化技術開発 ⑦ 実ＣＴデータへの適用による再構成ソフトウェア適合化開発		
指標目標値（計画及び実績）		
終了時評価時（27 年度）	計画： ① 分解能評価用ゲージ(評価範囲 50 μm～1,000 μm) の開発、製作、分解能評価手法の提案。 ② 測定誤差評価用（評価範囲 400 ㎜) の製作および幾何学的誤差の校正手法の開発。 ③ 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。 ④ 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。 ⑤ 0.05 ㎜ から 400 ㎜ に対応する内部寸法の計測用ゲージ及び評価法の開発。	実績：達成 ① 分解能評価用ゲージ（評価範囲 50 μm～5,000 μm）の開発、製作を経て分解能評価法を提案した。(達成) ② 評価範囲 400 ㎜ の CFRP ボールシャフトフォレストゲージを設計、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。(達成) ③ 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。(達成) ④ バック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。(達成) ⑤ 内部寸法の計測ゲージ及び評価法の開発を行った。寸法の測定範囲が 0.05 mm から 400 mm において不確かさ

		が 1 μm から 4 μm 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。(達成)
	⑥ 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。	⑥ Convex 法との連携による耐雑音性の向上、四分木再分割と Dual Marching Cubes 法の組み合わせによる適応的逐次再構成に対応した表面抽出機能を実現した。既存の均一格子による逐次再構成アルゴリズムに比較し、10 倍以上の大幅な再構成ボリュームデータの容量削減、および演算時間の短縮化を実証した。(達成)
	⑦ 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。	⑦ X線源の動作特性を把握した装置運転ソフトウェア群(ワークステージ駆動ソフト)、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(計測データ重合処理ソフトと、運転計画ソフト)を開発した。(達成)

＜共通指標実績＞

論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	国際標準への寄与	プロトタイプの作成
10	―	―	―	―	―	7

３）国際標準化への取り組み

（１）研究開発内容

〈概要〉

本事業の成果である高エネルギーX線CTの特性及び計測特性の客観的な評価手法について、計測特性の定義、寸法及び形状測定精度の評価及び仕様に対する合否判定を内容とする精度評価法を、座標測定機の精度評価法を審議するISO／TC213／WG10に対して国際標準化提案した。具体的にはWG

10での合意形成を目的として同ワーキンググループに設置されているX線CTタスクフォースへの参画による情報収集および当該研究成果が反映されるよう主張の展開を行った。また本事業の成果を国際標準化するにあたって、当該規格のフレームワークを実験的に検証するためのラウンドロビンテストを主導するとともにその結果を踏まえたWG10への日本意見の浸透を図り、NWIP[注 1)]／CD[注 2)]投票に移行する合意を形成した。

注1)　NWIP : New Work Item Proposal（新規格の開発提案）

注2)　CD : Committee Draft（技術委員会ドラフト）

<WG10 及びX線CTタスクフォースへの参画による情報収集と主張の展開>

計測用 X 線 CT の産業面での利活用の広がりと期待を反映し、ISO 国際標準化の作業が ISO/TC213/WG10 において着手された。この国際標準化の流れの中で、ドイツは自国のガイドライン VDI/VDE 2617-13 をそのまま ISO 規格化することを提案してきた。

このガイドラインは、座標測定機の性能評価規格である ISO 10360 シリーズ、特に長さ測定誤差による性能検査を規定した接触式座標測定機のための ISO 10360-2 及び接触式座標測定機のためのプロービング誤差による性能検査を規定した ISO 10360-5 について、計測用 X 線 CT に適用する場合のガイドラインとして出版された。理念としては既に技術的に確立され産業界に広く普及している ISO 10360 シリーズ規格との同等性を考慮した記載となっている。これによって、長さ標準にトレーサブルな測定性能の評価を公的なガイドラインとして出版する一定の意義を果たしたと考えられる。

日本はこのガイドラインについて、非測定物の透過画像をもとに再構成を行う X 線 CT に特有な物質を透過することに起因する測定誤差をほぼ考慮していない課題を指摘した。これにより日本をはじめ米国など主要国の間において、既存の枠組みの延長ではなく、計測用 X 線 CT に特徴的なフレームワークを構築することの必要性について合意形成を図ることができた。

〈国際標準化フレームワークの実験的検証のためのラウンドロビンテスト〉

計測用 X 線 CT の国際標準化にあたって、特に日本とドイツとの間の技術的見解の相違が目立ち、WG10 での合意形成の大きな障壁となった。特にマテリアル透過の影響をどのような器物でどのような条件および測定量により検証するかについて、見解の収束を図る必要があった。そこで、WG10 が主催する国際ラウンドロビンテストを企画し、その実験結果に基づいて合意形成を図ることとなった。

日本及びドイツの共同執筆により、ラウンドロビンの目的、器物、データ処理方法、日程計画などについてプロトコルを作成し、それに基づいてラウンドロビンテストを実施した。持ち回りは日本・米国・中国ループと、欧州ループの 2 系統のループにより実施した。産総研は実際に持ち回りに供される器物及びその校正値を PTB と連携して提供した（図 24、図 25）。

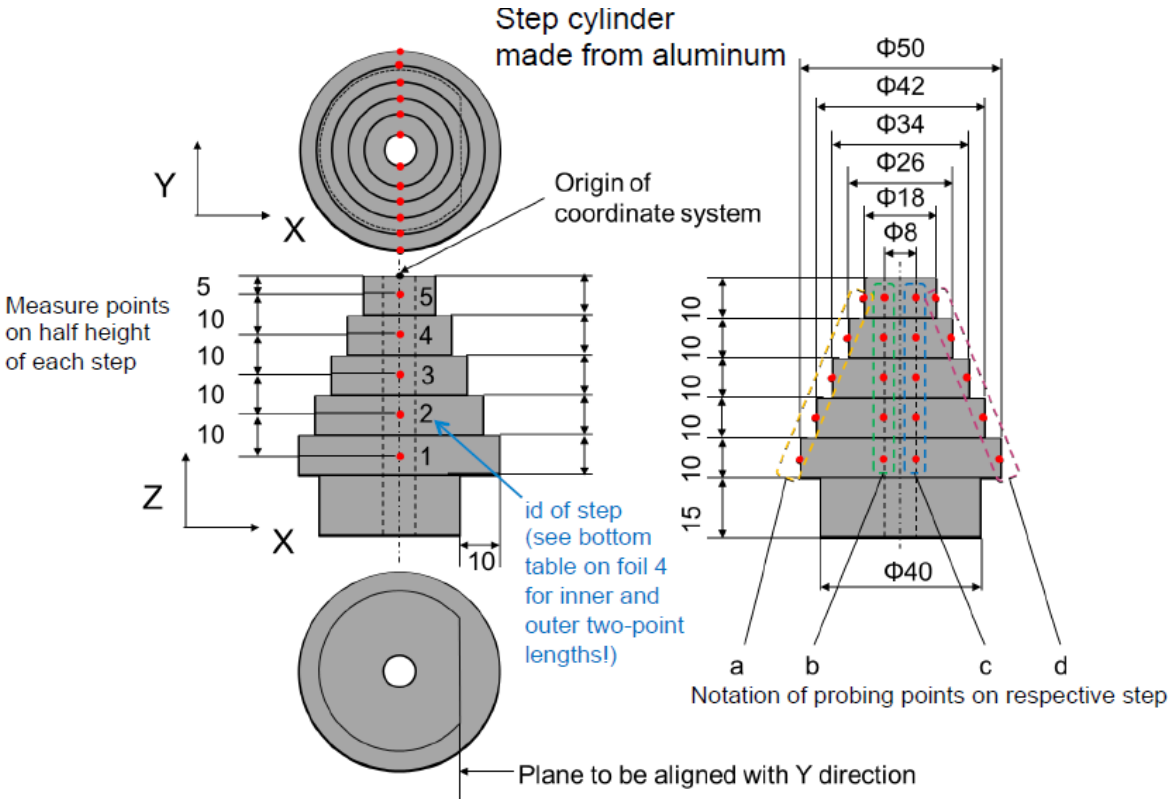

図 24 ラウンドロビンに供したステップシリンダの仕様

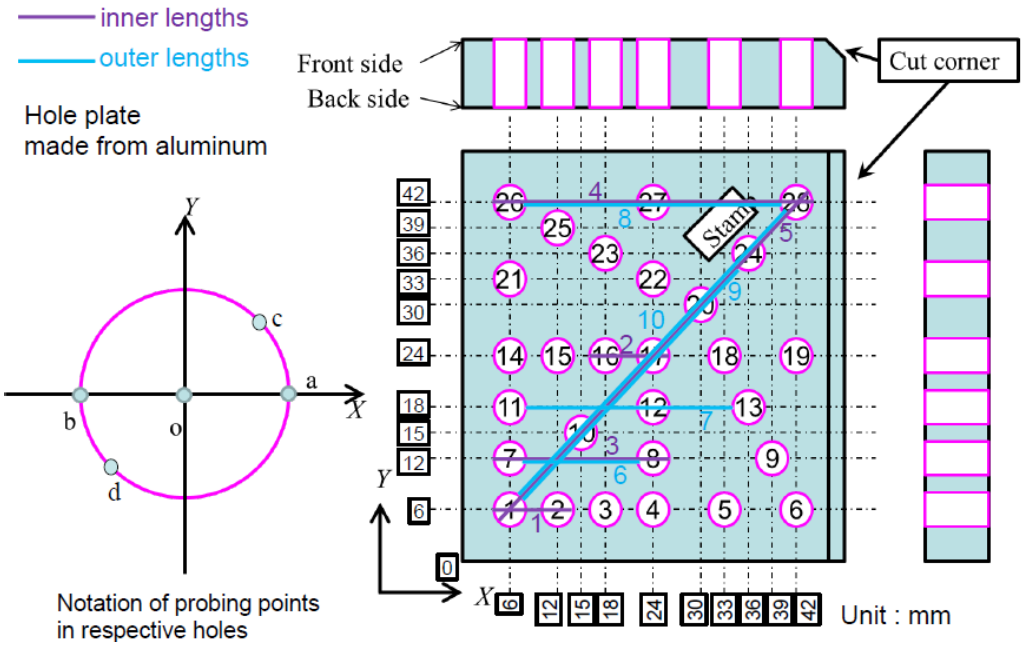

図 25 ラウンドロビンに供したホールプレートの仕様

日本からの主張に基づき、ドイツが主張する 45 度傾斜のホールプレート測定は、測定結果に現れる物質透過の影響がほぼ全ての穴形状についてよく似た相似な傾向となることについて概ね賛同が得られた。また、ホールプレート測定を行う場合には、水平姿勢に設置し、X 線 CT のテーブル回転軸方向とホールプレートの穴の軸方向が平行となる姿勢が必須であることについても概ね合意が形成された。一方では

ステップシリンダについては、最新の適応的閾値決定アルゴリズムなどの進歩により、必ずしも物質透過の影響を抽出することができるとは限らないことについても概ね合意が形成された。これらの合意により、計測用Ｘ線 CT の国際標準化提案を具体的に原案としてまとめる作業に着手することを念頭に、国際標準化のためのフレームワーク文書を作成した。

〈国際標準化フレームワークの検討〉

前回 WG10 会議で合意されたホールプレートとステップシリンダを使用した持ち回り測定の結果の報告が各参加者から行われた。持ち回りは欧州ループ（PTB, NPL, Werth, Carl Zeiss, Nikon（ただし洪水被害に起因する棄権となった））、及び日米ループ（NMIJ, North Star）により行われた。欧州ループの結果は総じて、ステップシリンダの測定誤差の方がホールプレートの測定誤差よりも小さくなる結果を示し、日米ループの結果は互いに非常に似た傾向を示すことを明らかにした。

産総研からは持ち回り測定のプロトコルが指示する報告内容に加え、ホールプレートの測定誤差についての追加解析結果を報告した。ホールプレートの測定結果に現れるマテリアル透過の影響は、各穴の形状偏差として現れることを中心に、例えばホールプレートの 45° 傾斜姿勢での測定結果では、どの穴の形状偏差もほぼ同じ傾向で相似に現れることについて実験結果をもとに明らかにした。また、0° 姿勢での測定結果では、各穴の形状偏差が回転対称に現れ、その傾向はホールプレートの外側の輪郭を構成する矩形の、すなわち回転非対称な形状の影響を強く受けていると示唆されることを示した。これらの結果を基に、今後の ISO 国際標準化に当たってマテリアル透過の影響を考慮した性能検査を行うための方法として、0° 姿勢のホールプレートの測定を中心に据えて進めることを提案した。これにより、これまで日本から主張してきたステップシリンダを使用する検査を一旦取り下げることとなった。ただし、0° 姿勢のホールプレート測定は、マテリアル透過の影響に注目すると、ステップシリンダ測定と同等の誤差要因を見ていることになり、日本にとっては名を捨てて実を取ることになる。WG10 の議決には、マテリアル透過の影響を受ける性能評価法として、0°姿勢のホールプレート測定を中心として検討することが明記された。

〈プロジェクトリーダの指名獲得及びＮＷＩＰ／ＣＤ投票への移行決議〉

計測用Ｘ線ＣＴの精度評価法の国際標準開発を行うＩＳＯ／ＴＣ２１３においてプロジェクトリーダへの指名を獲得し、標準開発を先導して開発に取り組むこととなった。また、これまでのフレームワークの構築に対する成果に基づき、NWIP／CD投票に付すことについて合意形成に成功し、WG10 の決議を得ることができた。

（２）事業アウトプット

事業アウトプット指標		
25 年度および 26 年度 ＩＳＯ／ＴＣ２１３／ＷＧ１０に対して国際標準化提案する。		
指標目標値（計画及び実績）		
終了時評価時（27 年度）	計画： 国際標準化提案およびＮＷＩＰ／ＣＤ投票への移行の決議。	実績：達成 国際標準化提案およびＮＷＩＰ／ＣＤ投票への移行の決議

		を得た。（達成）

＜共通指標実績＞

論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	国際標準への寄与	プロトタイプの作成
―	―	―	―	―	1	―

３．当省(国)が実施することの必要性

経済産業省では、我が国の製造業の大半を所管し、かつ、産業技術分野における知的基盤政策を推進する立場から、経済成長、産業競争力強化を図る。

特に、我が国が強みを有する「ものづくり」において、計測技術は製品やサービスの質及び量を定量化する重要な知的基盤であり、同時に計測結果の信頼性を保証する計測標準も計測技術を支える重要な知的基盤である。そのため、これら計測技術の知的基盤の整備を通じて、我が国の強みを活かし世界の競争に勝ち抜く「ものづくり」への支援に貢献し、さらには国際競争力の維持・強化、安全安心の確保、イノベーション創出の環境整備に貢献する。

本事業は『第４期科学技術基本計画』においては「国は、先端的な計測分析技術及び機器について、事業化の主体や利用者を交えた連携体制による開発を進めるとともに、開発された技術や機器について、大学や企業等の研究開発機関や市場への普及、活用を促進する。」として位置づけられる。

X 線 CT 技術は主に医療診断用に多く利用されている技術であるが、元々は物理学上の発見を医療に応用したものであり、理工学、医学など幅広い分野にわたって波及効果とイノベーションをもたらした。この分野は日本が世界において競争力を有する分野である。

この X 線 CT 技術を「ものづくり」に応用するための高エネルギー高分解能 X 線 CT 技術を開発し、計測標準及びそれを用いた評価手法の確立と国際標準化を一貫して行うことによる社会的性格の強い知的基盤の形成は、国が実施することが必要である。

本事業は、複雑で高度な技術を結集して行う必要があり、事業化の可否の判断の難しさなどから研究開発リスクが高く、民間には新規に技術開発投資を行う人的・資金的な余裕がないため、国が関与し、産学官が連携して研究開発を行う必要がある。

本事業は、図２６のとおり『技術戦略マップ 2011　計量・計測システム分野』に位置づけられる。

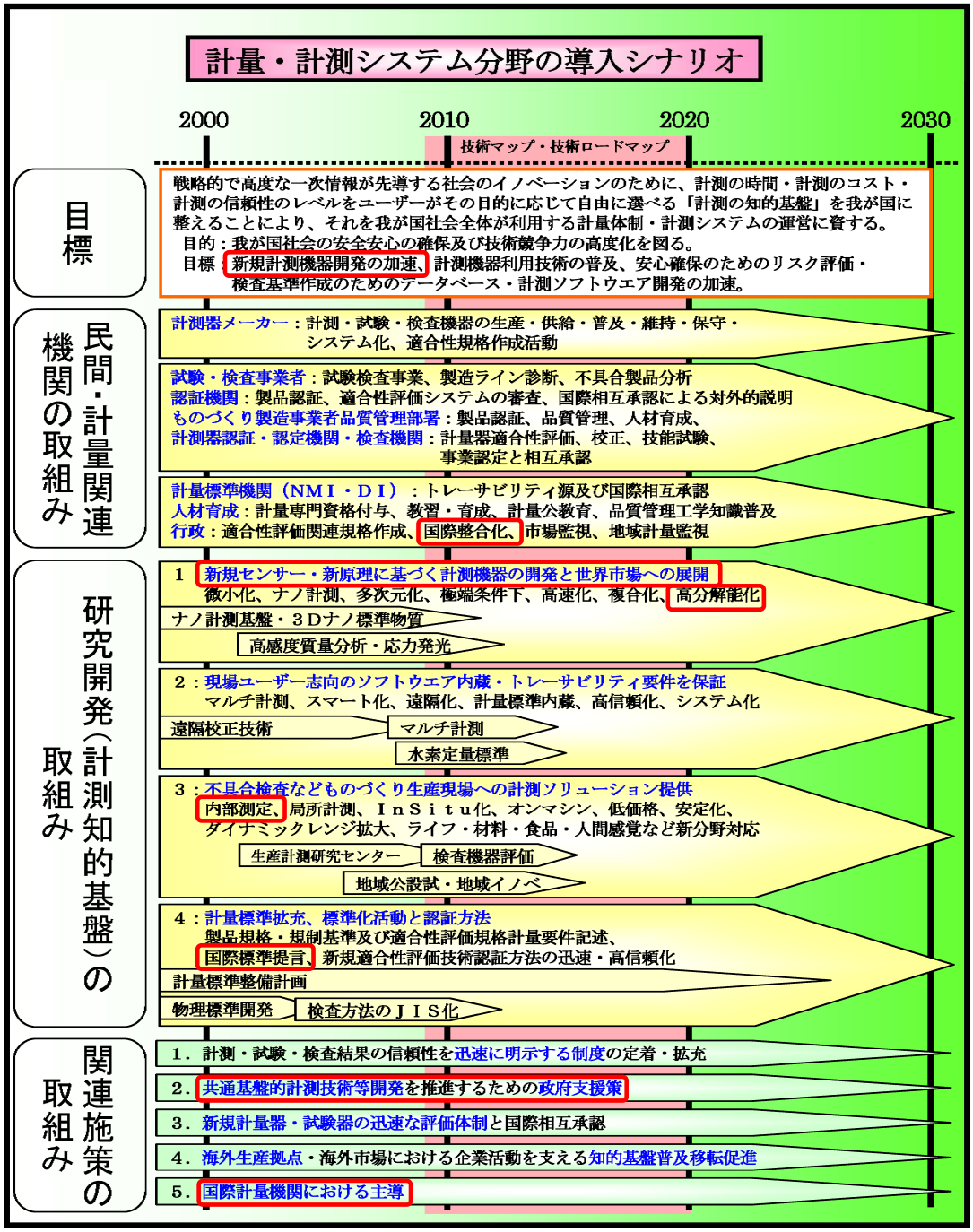

図２６　技術戦略マップ 2011　計量・計測システム分野

４．事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ（図２７）

32 年度における事業アウトカム目標値である以下の 3 項目についてそれぞれ記す。

① 高エネルギーＸ線ＣＴ装置の普及（平成 32 年度 300 億円）

本事業によって開発した高エネルギー高分解能 X 線 CT 装置 ”*eXTRACT*” の撮像能力などを最大限に活用し、日本の産業界に向けて活発な情報発信を行うとともにアプリケーション開発を進め、成果普及を最大化する観点で連携して取り組む。

本事業のプロジェクトリーダである高辻が会長を務める産総研コンソーシアム「３次元内外計測

コンソーシアム」は 14 年度に設立されて活動を開始し、法人会員 31 社、及び個人会員 40 名を数えるに至っている。３次元内外計測コンソーシアムは X 線 CT による幾何形状計測に関連する情報の共通認識化を図りつつ、３次元内外計測に関する技術情報の情報交換及び利用促進を行い、産学官の連携を通して関連産業の発展に資するとともに研究成果を広く社会に普及することを目的として活動している。3 次元内外計測コンソーシアムの活動においては、eXTRACT の開発状況および得られた成果についても、タイムリに情報提供を行い、特に開発に強い関心を寄せている法人会員各位からのフィードバックをいただいてさらに高度な開発に貢献し得る情報を収集することに継続して取り組んでいる。

eXTRACT の利活用促進およびアプリケーション事例の開拓を目指し、28 年度には 3 次元内外計測コンソーシアムの法人会員を対象としたテストスキャン事業に着手している。このテストスキャン事業では、まず法人会員向けに調査票を配信し、対象物に関する幾何計測ニーズに関する情報を収集している。収集される法人会員各社の記載内容に基づいてニーズ情報等を分類し、eXTRACT に期待される計測のニーズとそれを実現するために必要な技術的ブレークスルーについて整理し、実際にテストスキャンを実施していく。

また、28 年度から開始した産総研予算によるプロジェクト「３Ｄ計測エボリューション」では、３Ｄ造形と３Ｄ計測との連携によるクローズドループエンジニアリングの実証を目的として、特に３Ｄ計測については計測用Ｘ線ＣＴによる内外計測による知見の獲得と共有に期待している。当プロジェクトの推進を通して集積される知見のうち、計測用Ｘ線ＣＴに関連するものについては、３次元内外計測コンソーシアムの活動とも連動させて情報共有および情報発信を行う。

これらの活動を通してものづくり産業の中での高エネルギー高分解能Ｘ線ＣＴのより一層の活用および普及にむけて、アプリケーション事例の蓄積を計り、産業界への普及活動を加速させて行く。最終的に 32 年度における高エネルギー領域を含む計測用Ｘ線ＣＴの市場シェア 300 億円に向けて貢献して行く。

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

高エネルギーX 線 CT による検査事業では、例えば自動車産業ではパワートレイン周りの精密加工された金属部品やダイカスト成形品、また電装系周りでは各種パワー半導体を含む実装基板やそのアッセンブリなど、高エネルギーX 線 CT 装置の適用が期待される製品・部品は多岐に渡っている。複雑な形状の測定対象物を従来技術である接触式座標測定機等を用いて評価するために必要な工数に対し、高エネルギーX 線 CT を用いて同じ測定対象物を評価する場合には、測定時間が約 1/10 倍になるとの報告がある。例えばエンジンブロックの 3 次元形状データを作成するのに従来の形状測定技術で数ヶ月の期間を要した測定評価の工程について、高エネルギーX 線 CT の導入により、1 週間に激減した事例がある。

航空機産業では、CFRP 製品・部品の生産工程における大量のカットロス、NG 部品、期限切れ（劣化）、また CFRP 製品の品質管理用試験片を精算する必要性などから生じる、全投入 CFRP 量の 30～50%程度が廃棄される現実がある。こうした工程では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。具体的には、NG 部品に生じた亀裂や気泡などの欠陥を特定して分析して切断条件に反映したり、引張試験や変形試験で材料内に生じた繊維の破断や剥離状況を評価したりして、炭素繊維の含有量や繊維の織込み方法の見直しにつなげることが考えられる。

さらに、計測用 X 線 CT 装置の測定性能を長さ標準にトレーサブルに行うには、長さ標準に対してトレーサブルに校正された参照標準器を参照して性能評価を行う必要がある。産総研は物理標準整備計画にしたがい､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計画により研究開発に取り組んでいる。この計画では、X 線 CT の性能評価に用いられるフォレスト、ホールプレート、ステップシリンダ、各ゲージについての依頼試験の受託を通した標準供給を開始する予定である。

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。

28 年度現在、ISO/TC213 において NWIP/CD 投票に付すことの決議が得られていることから、技術的見解の一致しない傾向の強いドイツに対する意見の収束に向けた情報発信および WG10 における多数派工作を加速し、NWIP/CD 投票の実行を通して規格草案のフレームワークに対する承認を得る。

29 年度以降、DIS の審議のステージに国際標準化の段階を進め、関係各国との意見調整を活発に行う。その際、新たに明らかになった技術的懸案事項については、いち早い課題の明確化を計り、国内及び関係各国との情報共有・連携のあり方などについて、国益および日本の産業界の利益にかなう方針を選択してその解消に取り組む。最終的に 31 年度に ISO 国際標準の制定を目指す。

国内に向けては、3 次元内外計測コンソーシアムを国内対策委員会分科会相当と位置づけて、ISO 国際標準化における技術的懸案事項をいち早く共有するとともに、必要に応じて実験的データ収集やラウンドロビン測定を企画・実行することによって、日本の産業界の意見を反映した、日本の産業界の強みをサポートする技術的要求事項となるよう、活動を推進する。また、最新の国際標準化の進展状況について、国内向け普及セミナーを規格・実行し、国内産業界への普及を後押しする。

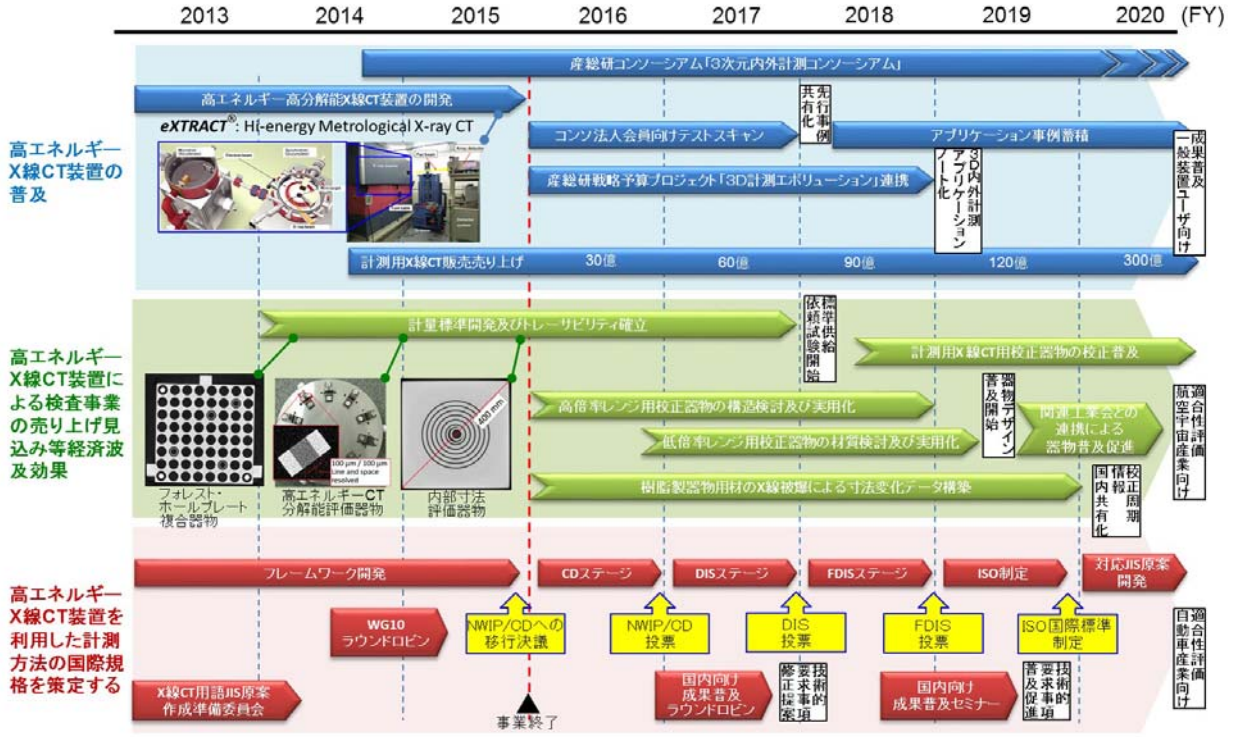

図２７　事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

５．研究開発の実施・マネジメント体制等（図２８）

研究開発の実施にあたっては、プロジェクトリーダ（産総研：高辻利之）がプロジェクトマネージャーとしてテーマ毎に設定したテーマリーダーのマネジメントを行うことによって全体の工程管理を実施し、関係機関との連携を密にとってプロジェクトを推進した。具体的には、プロジェクトリーダのリーダシップのもと、4 回/年度の頻度でプロジェクトリーダ、および各テーマリーダーによる運営会を開催することにより、計画通りの研究成果の導出に向けたマネジメント体制作りとその実践を行った。運営会では、各テーマの進捗状況の確認、研究の推進における種々の課題の共有とその解消に向けた議論、各テーマ間の調整を要する事項についての進捗調整などについて率直に話題を持ち寄ることにより、遅滞のない研究テーマの推進に心がけた。なお、本事業のプロジェクトリーダ、およびテーマリーダーはそれぞれ三次元内外計測コンソーシアムの会長および幹事以下主要メンバとして運営に関与し、本事業の研究開発における情報交換・共有を図っただけでなく、成果普及においても足並みの揃った活動に取り組んだ。

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。

本事業において取り組む高エネルギーX 線 CT のための計測標準及び工業標準の開発のためには、長さの国家標準に対するトレーサビリティを確保するための専門知識と座標測定に関する知見、及び ISO 国際標準化／JIS 工業標準化を核とした工業標準開発に関する専門知識と工業標準化にかかる知見が不可欠である。本事業のプロジェクトリーダ、プロジェクトマネージャーである産総研 高辻利之、評価技術開発、および標準化リーダーである産総研 阿部誠は国立研究開発法人産業技術総合研究所計測標準研究部門（事業当時）に所属し、計測用 X 線 CT の性能評価法に関する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され、これまで ISO 10360 シリーズ（性能評価法）及び ISO 15530 シリーズ（不確かさ見積り）の審議において国際的にも中心的な役割を果たしてきた。特に、2013 年に制定された ISO 10360-8（光学式距離センサ付座標測定機）については高辻利之がプロジェクトリーダを務め、ISO 10360 シリーズの中では標準化における技術的難度が最も高い標準開発を、強いイニシアティブの発揮と国際的な利害調整力のバランスにより達成した。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の指名を受け、その開発に本事業の終了後も継続して取り組んでいる。なお産総研 阿部誠は ISO 10360-13（非直交型光学式座標測定機）の開発におけるプロジェクトリーダに指名を受け、その開発を推進している。

本事業の成果物として X 線 CT の高分解能化を図ると、特に再構成計算の演算負荷が増加し、一方では画像ノイズの影響が相対的に増大することから、計算機の演算負荷が軽く、また画像ノイズにロバストな再構成演算アルゴリズムを実現することが重要となる。本事業のソフトウェア開発リーダーである東京大学 鈴木宏正教授は、3 次元形状に関するデータ処理技術、中でも産業用 X 線 CT

の画像処理技術において顕著な研究業績を上げているこの分野の世界的な専門家であり権威として内外に広く知られている。本事業における課題解決のため、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。

国民への広報活動として、iCT2014 でのキーノート講演、iCT2016 での一般講演、icOPEN2015 での一般講演、産総研テクノブリッジ 2015 における技術講演により成果普及に務めた。また、3 次元内外計測コンソーシアムの研究会を 26 年度より 3 回/年度の頻度で開催しており、各々の研究会において本事業の進捗状況の報告、得られた知見の共有、コンソーシアム会員からのフィードバック情報の収集に努め、より一層活発な広報活動を推進するための基盤作りに努めるとともに広報活動の波及効果の拡大を図っている。

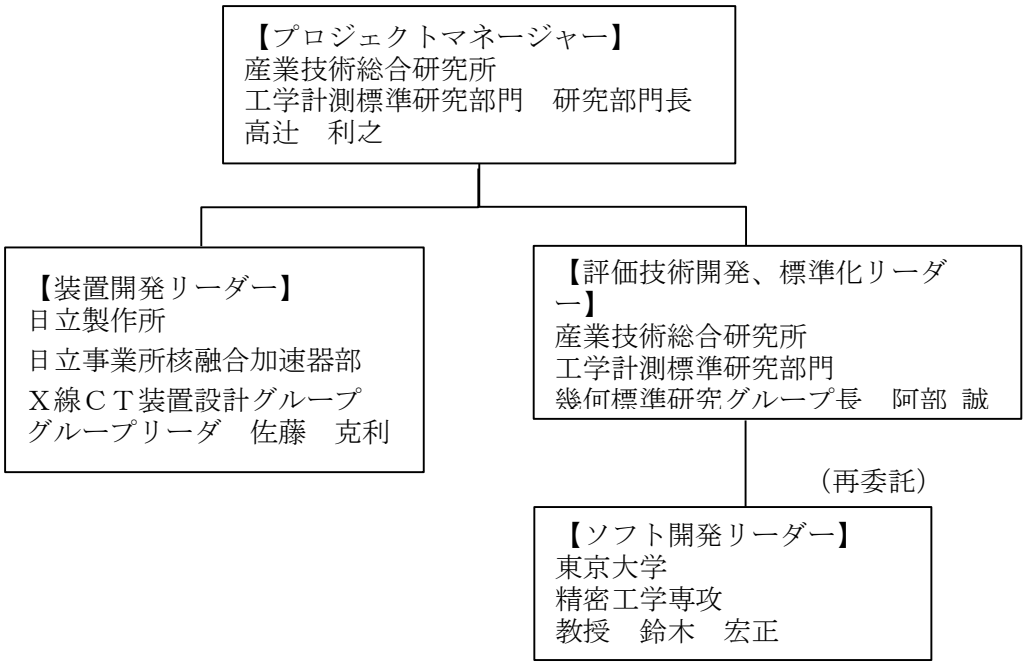

図２８　本事業の実施体制図

６．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 ㎜以上の透過力を有すると同時に、0.1/0.1 ㎜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、29 年度の X 線 CT のための標準供給及び 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。

本事業のアウトカムの中で、高エネルギーX 線 CT 装置を含む計測用 X 線 CT 装置の普及およびその活動を通した、装置製造企業及び装置ユーザ企業を含んでの日本のものづくり産業の振興は、本事

業のメンバ及びその所属団体の業務所掌について狭義に取り組むだけでは達成することができない。既に３次元内外計測コンソーシアムを通して国内の関連企業に向けた情報発信及び技術情報の共有を強力に推進している。また NMIJ 計測クラブ「CMM ユーザーズクラブ」の活動を通してさらに裾野の広げ、潜在的装置ユーザ層に向けたわかりやすい関連情報の発信についても継続して取り組んでいる。計測用 X 線 CT の ISO 国際標準化と相まって、計測用 X 線 CT 装置はものづくり産業にとって重要な知的基盤の一角を構成するものとみられ、32 年度のアウトカムの実現に向けたロードマップに記載の実施内容について、社会情勢の変化にも柔軟に対応しつつ取り組んでゆく。

ものづくり産業の活動の中で、計測用 X 線 CT を含む測定機それ自体は製品・部品を加工して生み出すことが無い。一方では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。

我が国を代表するものづくり産業であ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、リコール一件あたりのインパクトは２万台／年となる。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、自動車１台あたりのリコール対策費用を 10 万円と見積もることにより、
20,000 台×5 件×100,000 円=10,000,000,000 円の経済効果が見込まれる。

世界最大の炭素繊維メーカーとして東レが有るが､その機関誌 TORAYCA の中の事業拡大方針では、30 年近傍 5,000 億円連結売上高になると予測している。炭素繊維に樹脂を浸透させて固めた炭素繊維強化プラスチックス（CFRP）は、強度が鉄の４倍、重量が鉄の３分の１であり、自動車の外板や航空機の機体などに使用が期待され、自動車では 30%、航空機では 20%の軽量化に寄与するとされている。一方 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。CFRP は材料自体の性能は優れているが、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。こうした工程では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。具体的には、NG 部品に生じた亀裂や気泡などの欠陥を特定して分析して切断条件に反映したり、引張試験や変形試験で材料内に生じた繊維の破断や剥離状況を評価したりして、炭素繊維の含有量や繊維の織込み方法の見直しにつなげることが考えられる。これらの CFRP の構造評価で特に問題なのが、内部まで調べるために切断すると、繊維の配列方向に沿って新たな破断や亀裂が生じてしまい、評価したい元の欠陥と区別がつかなくなってしまうことである。このような場面では 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４つの原因（カットロス、NG、期限切れ、試験片)の内､２つの原因である NG 部品と試験片に対し､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、40%×（2／4）×（1／2）＝10% となり、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 5,000 億円／年×0.1＝500 億円
の経済効果が見込まれる。

以上のように、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、十分に応え得るものと考えられる。