



4-15. 観測機器の選定

世界最先端の性能が必要とされ、新規開発要素が多い観測機器システムについては、国産の最新技術を採用しつつ、コミュニティにおけるフロントローディングの成果を基本として、高い信頼性をもった開発が可能となるように選定した。

サブシステム	基本仕様	選定結果	新規/現存	国産/輸入	詳細
1 HXT	角度分解能：1.7分角以下 有効面積 (HXT+HXI)： 300cm ² 以上 (@30キロ電子ボルト)	Pt/C多層膜スーパーミラーの技術を用いた多重薄板積層光学系を採用。同一の望遠鏡を2セット使用して大きな有効面積を実現。指向精度確保のため、固定式光学ベンチに搭載。	新規	国産	p.35,36 参照
2 HXI	硬X線撮像能力 エネルギー分解能： 2キロ電子ボルト以下	テルル化カドミウム(CdTe)半導体とシリコン(Si)半導体のイメージング素子を組み合わせて、約50キロ電子ボルト以上の広いエネルギー範囲を検出。「すざく」で実証された低バックグラウンド化技術を継承。伸展式光学ベンチに搭載して焦点距離12mを確保。	新規	国産	p.37,38 参照
3 SXT-S SXT-I	角度分解能：1.7分角以下 有効面積(@6キロ電子ボルト)： - SXT-S 210 cm ² 以上 - SXT-I 360 cm ² 以上	「あすか」「すざく」と同様の「多重薄板積層方式」を継承して超軽量で大面積を確保。SXT-S、SXT-Iで同型の望遠鏡を使用。NASA/GSFCを製造の中心とし、密接な日米協力で開発。	現存技術 の改良	国際協力	p.39,40 参照
4 SXS	エネルギー分解能： 7電子ボルト以下 視野：3分角以上	すざくで実証済みのセンサ技術を用いる。 冷却システムをできる限りロバスタな設計にし、PMデュワーを用いた性能実証を行う。	現存技術 の改良	国産+ 国際協力	p.41-45 参照
5 SXI	軟X線撮像能力 視野：18分角以上	国産X線CCDの採用。 アナログ回路のLSI化による読み出しシステムにより小型化、低消費電力化をはかる。	現存技術 の改良	国産	p.46,47 参照
6 SGD	検出効率： 10% 以上 (@100キロ電子ボルト) 検出器面積：200 cm ² 以上 エネルギー分解能： 2キロ電子ボルト以下 角度決定精度：0.6度以下	多層のシリコン(Si)とテルル化カドミウム(CdTe)イメージング素子による半導体コンプトンカメラとBGOアクティブシールドによる狭視野コンプトンカメラ。ファインコリメータにより150キロ電子ボルト以下の角度決定精度を確保。	新規	国産+ 国際協力	p.48,49 参照



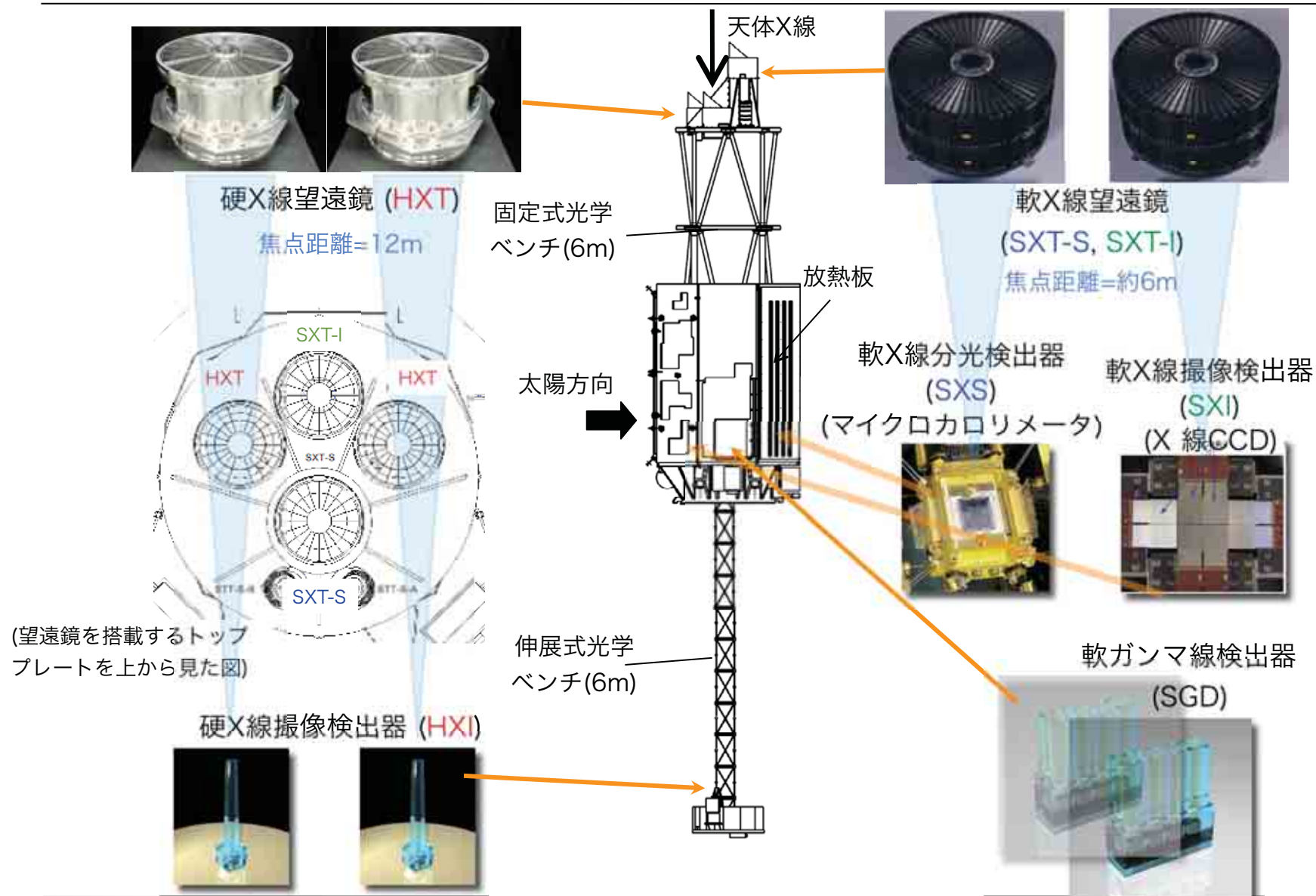
4-16. 衛星バスシステムの選定

ASTRO-H衛星バス系については「すざく」において採用された衛星バスを基本的に踏襲し、衛星全体のサイズアップへの対応、さらなる信頼性の確保、必要な範囲での新規技術の採用を行った。

	サブシステム	基本設計要求	選定理由と選定結果	新規/現存	国産/輸入	フロントローディング
1	構造系	低熱歪みにより高精度指向性を実現する。	衛星構体および固定式光学ベンチの炭素繊維強化プラスチック(CFRP)化	現存技術の改良	国産	「すざく」のものをベースに、より広範にCFRPを採用するとともに、熱歪みの伝搬を防ぐ構造(キネマティックマウント)を導入した衛星構造体を設計する。
2	熱制御系	観測機器を最適な温度範囲に制御。冷凍機の排熱を効率良く輸送。	温度制御系と温度測定系の統合	現存技術の改良	国産	小型科学衛星に搭載する熱制御系回路と同等のものを採用する。
3	電源系	軌道上に必要な衛星電力リソースを確保する。	リチウムイオンバッテリーの採用	現存技術の改良	国産	リチウムイオンバッテリーのサイクル寿命試験を実施中。
4	通信系	高速X帯通信によるテレメトリ送信とS帯でのコマンド受信。	マルチモードトランスポンダ(MTP)の採用(高速S帯通信による冗長化)。	現存技術の改良	国産	SDS-1衛星にMTPが搭載され、軌道上動作実証済み。
5	姿勢制御系	望遠鏡光軸を観測天体に向けて高精度に指向制御する。	姿勢制御のゼロモーメントム方式への変更。ホイールなどの国産技術の採用。	現存技術の改良	国産	MPC社のType-Lホイールを使用予定。角運動量は異なるが基本設計が同じType-Mホイールは、2009年1月に打ち上げられたGOSAT衛星に搭載され、現在まで問題無く動作している。Type-Lホイールの地上認定試験は出力トルク0.1Nmものが2005年に完了し、現在、出力トルクを0.2Nmに上げた改良型を開発中であり、どちらを使用するかは調整中。
6	データ処理系	観測機器の生成データを処理・蓄積する。	全面的なSpaceWire標準I/Fの採用によるネットワーク化。国産宇宙用MPUの採用。	新規	国産	SDS-1衛星にSpaceWire インターフェース実証モジュール(SWIM)として搭載され、軌道上動作実証済み



4-17. 観測機器配置





4-18. 硬X線望遠鏡 (HXT) [1/2]

HXT：硬X線 (>10キロ電子ボルト)領域の世界初の望遠鏡

国産ナノ技術による「スーパーミラー」を用い、従来は反射できなかったエネルギーが10キロ電子ボルトを越すX線を、約80キロ電子ボルト近くまで反射できるようにした日本独自の世界最先端技術。

1万電子ボルトを越すX線は、従来のX線望遠鏡のような全反射ではなく、ブラッグ反射の原理を用いる。広いエネルギー範囲をカバーするために、厚さ数ナノメートルの重・軽元素薄膜層の厚みを精密に制御し、連続的に変化させる。

ブラッグ反射の概念図

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

重元素 (Pt)
軽元素 (C)
周期長 (d)

ASTRO-Hの硬X線望遠鏡反射フォイル

TEM cross-section of Pt/C ML-SM (Ohnishi et al. 2004)

50nm

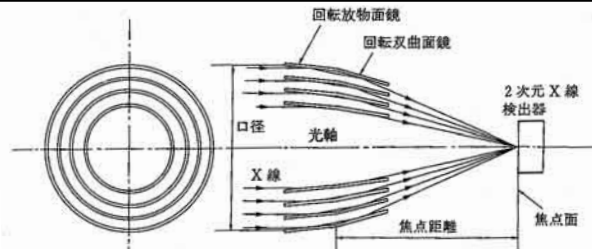
基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> 角度分解能 < 1.7分角 集光面積 > 300cm² (30キロ電子ボルトにて)
開発方針	<ol style="list-style-type: none"> Pt/C多層膜スーパーミラーの技術を用いて開発する。必要な有効面積を確保するために多重薄板積層光学系を採用。焦点距離12mによって約50キロ電子ボルト以上まで集光させる。 原子1個分の大きさに相当する精度（薄膜界面の凹凸は0.3nm）で制御するための装置を名古屋大学を中心にプロジェクトで設置し1台あたり約1300枚の反射鏡をインハウスで製作。 要求される有効面積は、同一の望遠鏡を2セット用意することで実現する。 プログラムのリスクを軽減するために、できるだけ早く最終工程までのラインを立ち上げる。
鍵となる技術開発	<ol style="list-style-type: none"> 製造コストと時間を削減するために採用した大型(長さ20cm)の反射鏡において、反射鏡全面に亘って、基板の成形・一様な成膜ができること。 80キロ電子ボルトもの高いエネルギー帯域のX線を用いた望遠鏡の集光特性の較正。



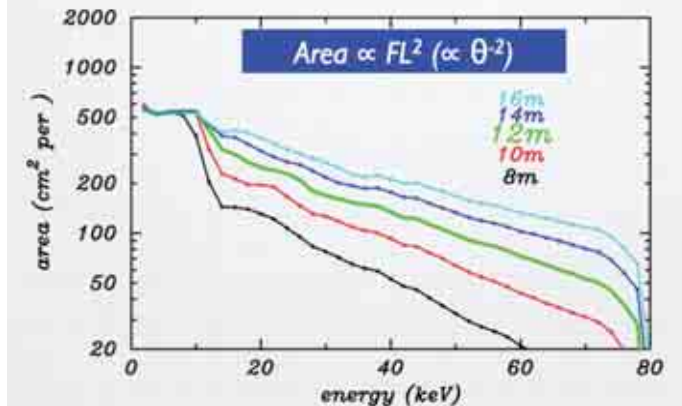
4-19. 硬X線望遠鏡 (HXT) [2/2]

HXTの開発方針 (1)

Pt/C多層膜スーパーミラーの技術を用いて開発する。必要な有効面積を確保するために多重薄板積層光学系を採用。焦点距離12mによって約80キロ電子ボルトまで集光させる。



D=45cm, FL=8/10/12/14/16 m

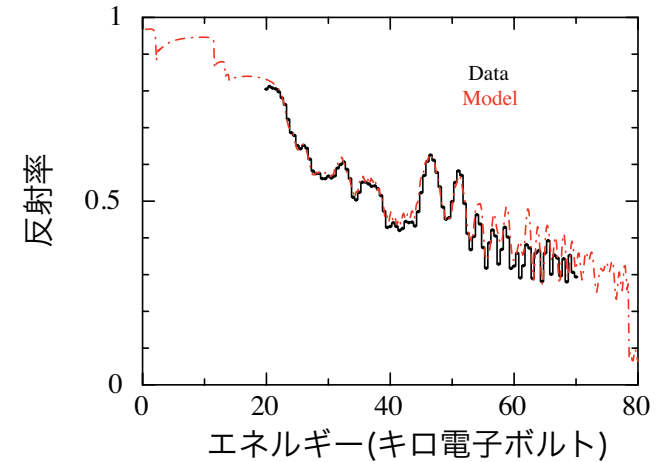


ウォルターI型X線望遠鏡における焦点距離と集光面積。10キロ電子ボルト以下は主に全反射の効果、10キロ電子ボルト以上は主に多層膜による反射の効果。80キロ電子ボルト程度の集光を行いたい場合は12mの焦点距離が必要。

鍵となる技術開発項目 (1)

製造コストと時間を削減するために採用した大型(長さ20cm)の反射鏡において、反射鏡全面に亘って、基板の成形、一様な成膜ができること。

- ・フロントローディングにより、必要な製造施設を部分的ではあるが整備し、一連の工程をへて長さ20cmの反射鏡全面に亘って、基板の成形、一様な成膜ができることを確認。
- ・独自のノウハウにもとづく重・軽元素薄膜厚の精密制御により、約80キロ電子ボルトまでの集光能力の確認(右図)。



鍵となる技術開発項目 (2)

80キロ電子ボルトもの高いエネルギー帯域のX線を用いた望遠鏡の集光特性の較正。

日本が誇る放射光施設SPring-8(蓄積電子エネルギー世界最高)を用いた性能評価用のビームラインをSPring-8のパワーユーザーとして整備し(右図)、12mの焦点距離の硬X線望遠鏡の特性評価を可能とした。



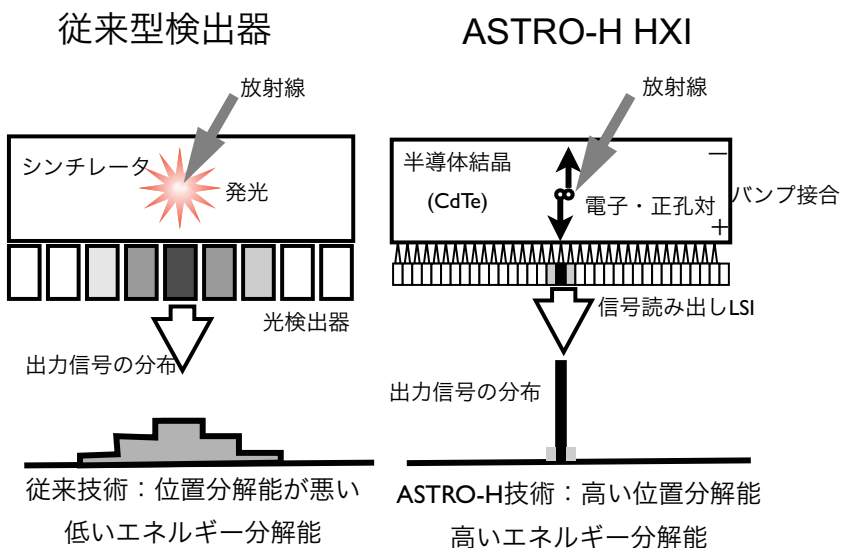


4-20. 硬X線撮像検出器(HXI) [1/2]

HXI：高分解能硬X線イメージングを可能とする我が国発の最先端検出器

高エネルギーのX線やガンマ線の撮像を可能にするものとして、世界に誇る日本の半導体技術が生み出した新しい高効率半導体素子を用いた日本独自の新型検出器。世界初の硬X線集光撮像による非熱的宇宙の観測を実現 (ASTRO-Hの新技术)。

10キロ電子ボルト以上のエネルギーを持つ硬X線、ガンマ線の領域で、検出効率、エネルギー分解能、イメージング能力に優れ、常温で動作する検出器はこれまで未開拓



基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> 硬X線撮像能力 エネルギー分解能 < 2キロ電子ボルト HXT(望遠鏡) と組み合わせて有効面積 300 cm² (30キロ電子ボルトにて)
開発方針	<ol style="list-style-type: none"> 世界に先駆けて実現したテルル化カドミウム (CdTe)半導体を用いたイメージング素子技術を基本とする。 シリコン (Si)半導体のイメージング素子と組み合わせることで、数キロ電子ボルトから80キロ電子ボルトの広いエネルギー範囲で、高感度焦点面検出器とする。 「すざく」HXD (硬X線検出器) で証明された低バックグラウンド化技術 (アクティブシールド) を継承、超低雑音化をはかる。 要求される指向精度を確保するために、検出器を伸展ベンチに搭載する。
鍵となる技術開発	<ol style="list-style-type: none"> 250ミクロンピッチ両面ストリップCdTe半導体イメージャー。 アナログ信号処理、ADCを内蔵したアナログLSIの開発、および耐放射線を含む性能評価。 軌道上での宇宙線環境を模擬するシミュレーションプログラム開発。



4-21. 硬X線撮像検出器(HXI) [2/2]

HXIの開発方針 (3)

「すざく」HXD (硬X線検出器) で証明された低バックグラウンド化技術(アクティブシールド)を継承、超低雑音化をはかる。

HXIの開発方針 (1)、 鍵となる技術開発項目 (1)

世界に先駆けて実現したテルル化カドミウム(CdTe)半導体を用いたイメージング素子技術を基本とする。

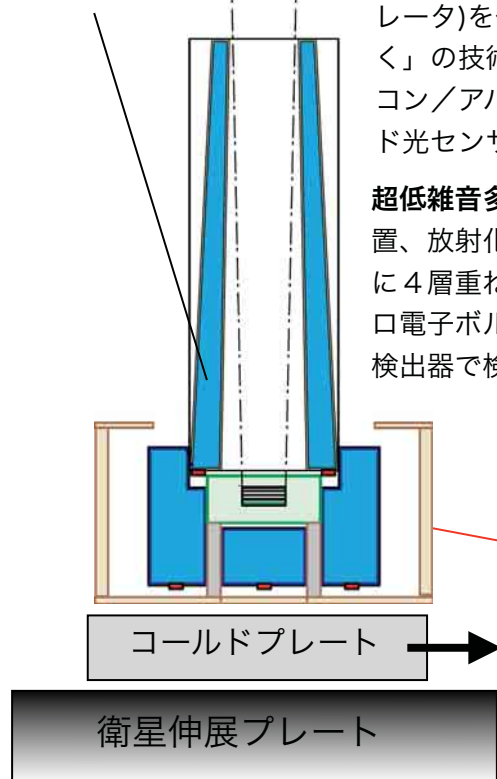
BGO結晶
+アバランシェ
フォトダイオード

日本で発明された井戸型アクティブシールドの採用。これにより宇宙線やガンマ線による雑音成分を激減できる。衝撃に弱い素材(BGOシンチレータ)を保護する機構は、「すざく」の技術から。新開発の高速シリコン/アバランシェフォトダイオード光センサーによりコンパクト化。

超低雑音多層検出器：CdTe検出器を一番下に設置、放射化による影響の少ないSi検出器層をその上に4層重ねた独自のハイブリッドカメラ。約20キロ電子ボルト以下はSi検出器で、それ以上はCdTe検出器で検出することで、感度向上をはかる。

(下図)世界で初めて実現した「硬X線/ガンマ線」イメージャー：400マイクロンピッチ両面ストリップ型CdTe検出器。高品質CdTe半導体、特殊電極技術、MEMSを応用した3D実装技術、低雑音アナログLSIなどの技術開発に基づく。

(下図) 試作センサーにより取得した30キロ電子ボルトの硬X線イメージ。



両面ストリップ型シリコン検出器 x 4層

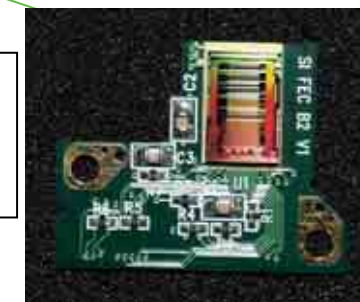


両面ストリップ型テルル化カドミウム検出器

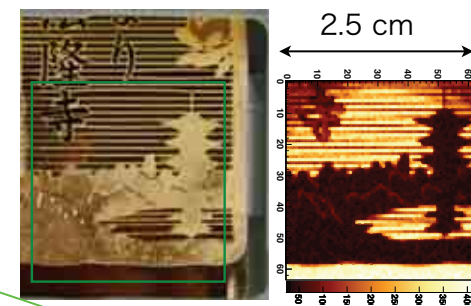
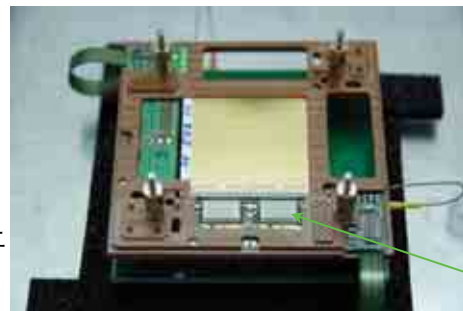
- ・ 250 μm ピッチ x 128ch(片面)
- ・ 素子厚は 500 または 750 μm

鍵となる技術開発項目 (2)

アナログ信号処理とADCを内蔵した多チャンネルアナログLSIの開発、および耐放射線を含む性能評価



(上図)超小型化の鍵を握る独自開発の低雑音アナログLSIと基板。放射線医学総合研究所の重粒子ビームを用いて耐放射線試験実施。現時点で問題なし。





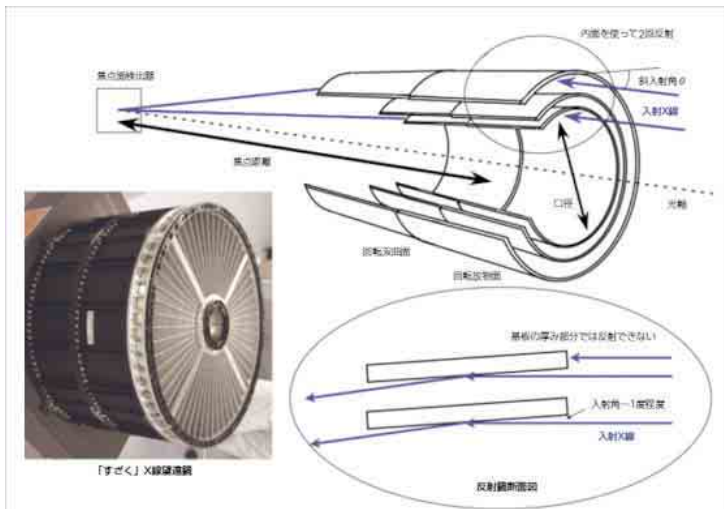
4-22. 軟X線望遠鏡 (SXT) [1/2]

SXT：超軽量大面積X線望遠鏡

ASTRO-Hで採用する軟X線望遠鏡は、NASAとの日米協力により、20年にもわたる開発が続けられてきた軽量で大有効面積を実現する技術にもとづく。

「あすか」以来、我が国のX線衛星が成果をあげてきた鍵となる望遠鏡技術。

斜入射X線反射望遠鏡は、全反射条件を満たす小さな角度でX線が、鏡面に入射するように作られる。X線の反射面には、金や白金など電子密度の高い金属がコーティングされる。また、回転放物面と回転双曲面の二つの反射鏡で二回反射することによって、光軸からはずれた方向での像の収差を小さくしたウォルターI型と呼ばれる光学系がしばしば用いられる。



基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> • 角度分解能：1.7分角以下 • 集光面積 (6キロ電子ボルトにて)： <ul style="list-style-type: none"> - SXS検出器と組み合わせて有効面積 210 cm² - SXI 検出器と組み合わせて有効面積 360 cm²
開発方針	<ol style="list-style-type: none"> 1. 厳しい重量制限で大きな集光面積を実現するために、「あすか」「すざく」と大きな成果をあげた超軽量ながら大面積を確保する「多重薄板積層方式」を継承する。 2. SXS、SXIで同型の望遠鏡を使用。 3. NASA/GSFCを製造の中心とし、密接な日米協力で開発(リーダーは日本)。 4. 角度分解能の向上のため、製造遅延のリスクを避けながら、最新の技術成果をとり入れる(「開発研究」移行時の助言)。
鍵となる技術開発	<ol style="list-style-type: none"> 1. 限られた開発期間の中で、角度分解能の向上のために必要な高精度の形状を実現するための改良点の洗い出し(「あすか」：3.5分角、「すざく」：2分角)。 2. 早い段階での角度分解能向上の見通しの確認。



4-23. 軟X線望遠鏡 (SXT) [2/2]

鍵となる技術開発項目 (1)

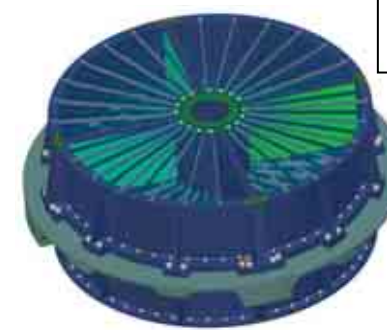
限られた開発期間の中で、角度分解能の向上のために必要な高精度の形状を実現するための改良点の洗い出し。

- ・ 大きな反射鏡の基板の厚さを150 μm から、230 μm もしくは300 μm に厚くすることで、高精度の形状を実現。
- ・ 反射鏡基板の成形に用いる金型の形状誤差を「すざく」の5 μm から2 μm に高精度化。
- ・ 用いる金型の数を、反射鏡の半径に合わせて「すざく」の40セットから150セットに増加。

鍵となる技術開発項目 (2) : 早い段階での角度分解能向上の見通しの確認。

60セットの反射鏡を収めた試作望遠鏡を製作。性能試験で角度分解能1.3分角を達成。改良の方向性が正しいことを実証

諸外国の望遠鏡との集光面積対重量の比較



軽量
大面積

衛星	Chandra (米国1999-)	XMM-Newton (欧州1999-)	すざく (日本2005-)	ASTRO-H
製作方法	研磨法	電鍍法	レプリカ法 (多重薄板積層方式)	レプリカ法 (多重薄板積層方式)
積層数	4層	58層	175層	210層
直径	120 cm	90 cm	44 cm	49 cm
有効面積	740 cm ²	1450 cm ²	460 cm ²	700 cm ²
総重量	1480 kg	440kg	20 kg	50 kg
有効面積重量比	0.5 cm ² /kg	3.3 cm ² /kg	23 cm ² /kg	14 cm ² /kg
角度分解能	0.5秒角	15秒角	120秒角	90秒角

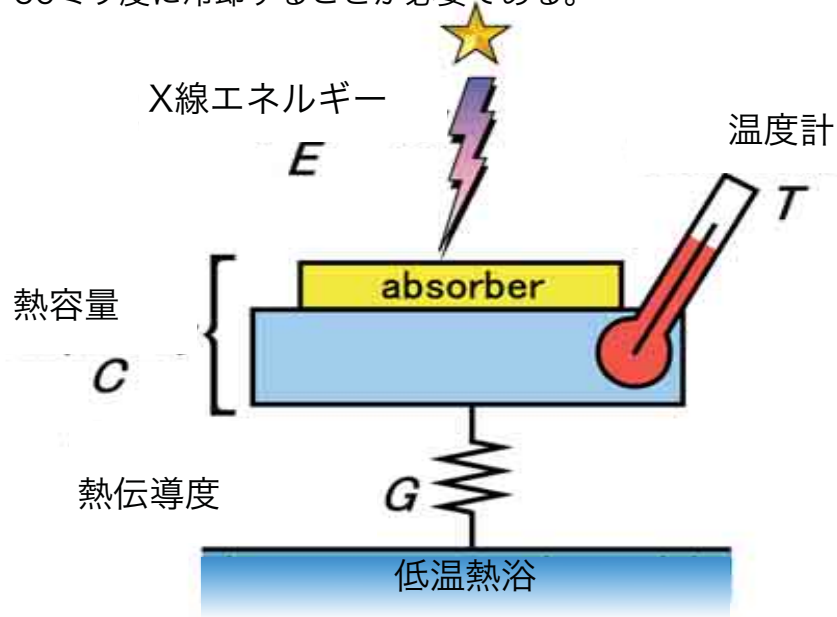


4-24. 軟X線分光検出器 (SXS) [1/5]

SXS：超精密分光観測が可能な最先端観測装置

X線観測が従来いわば「64色カラー画像」だったのに対し、ASTRO-Hは日米協力によるマイクロカロリメータという極低温技術を用い「2048色総天然色画像」を実現するもので、これにより高温ガスの運動が初めて測定可能となる。

マイクロカロリメータは、エネルギーを熱に変えて温度上昇を精密に測定する(下図)。そのために、センサー部を50ミリ度に冷却することが必要である。



基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー分解能 7電子ボルト以下 ・視野 3分角 ・SXT-S(望遠鏡)と組み合わせて有効面積210 cm² (6キロ電子ボルトにて)
開発方針	<ol style="list-style-type: none"> 1.マイクロカロリメータに関してはすざくで実証済みのセンサ技術を用いる。その範囲で、最新の技術成果をとり入れる(「開発研究」移行時の助言)。 2.世界の宇宙用マイクロカロリメータの研究者の力をあわせて開発する。 3.冷却システムをできる限りロバストな設計にする。PMデュワーによる性能実証を行う。
鍵となる技術開発	<ol style="list-style-type: none"> 1.衛星と冷却システムとの熱、機械式インターフェース。すざくの経験に基づいたヘリウム排気パスの確保。 2.ロケット打ち上げ時の振動の影響を考慮した設計。 3.機械式冷凍機の低振動化と高寿命化。 4.世界ではじめての極めて高いエネルギー分解能を持つマイクロカロリメータを機上で較正するためのセンサー較正用X線源(SRONが担当)。



4-25. 軟X線分光検出器 (SXS) [2/5]

SXSの開発方針 (1) マイクロカロリメータに関してはすざくで実証済みのセンサ技術を用いる。その範囲で、最新の技術成果をとり入れる。

「すざく」搭載の素子に比べて改良点

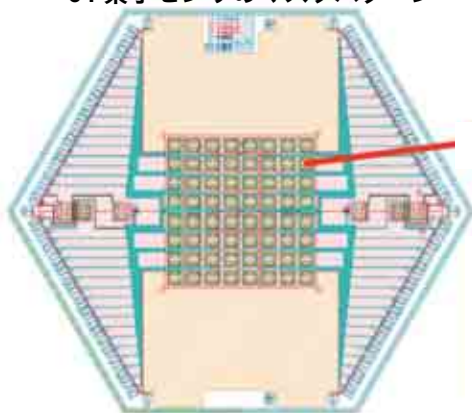
1. 動作温度を60ミリ度から50ミリ度に
2. 吸収体を変更することで熱容量を1/4に

→エネルギー分解能の向上

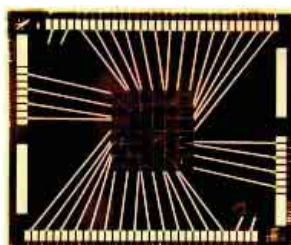
実験室では、目標の7電子ボルトに対して、4電子ボルトに至る最高分解能スペクトルが得られている。

ASTRO-H搭載の実機にこの性能を実現することができれば、当初目標以上の科学目標が達成可能になる。

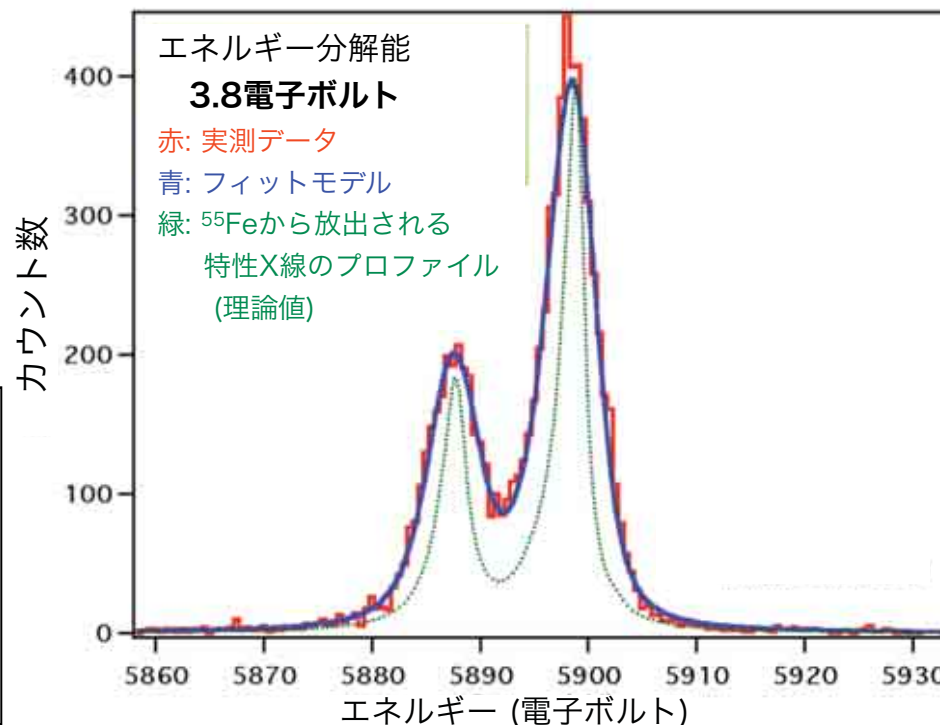
64 素子センサのマスクパターン



36 素子センサ
(「すざく」XRS)



⁵⁵Fe 放射線源に対するエネルギースペクトル



元来6x6=36素子のセンサーで、科学目標を達成できるが、最新の技術成果をとりこみ、より科学成果をあげるために、8x8=64素子の大面積センサーの採用を検討した。結果として、回路規模が倍になるなどのシステムの複雑性が増すことをプログラムのリスクと判断し、当初の素子数(36素子)で計画を進める事とした。各素子のサイズが大きいと分光能力が劣化するため、要求される視野を得るためには 36 素子程度のアレイが必要。

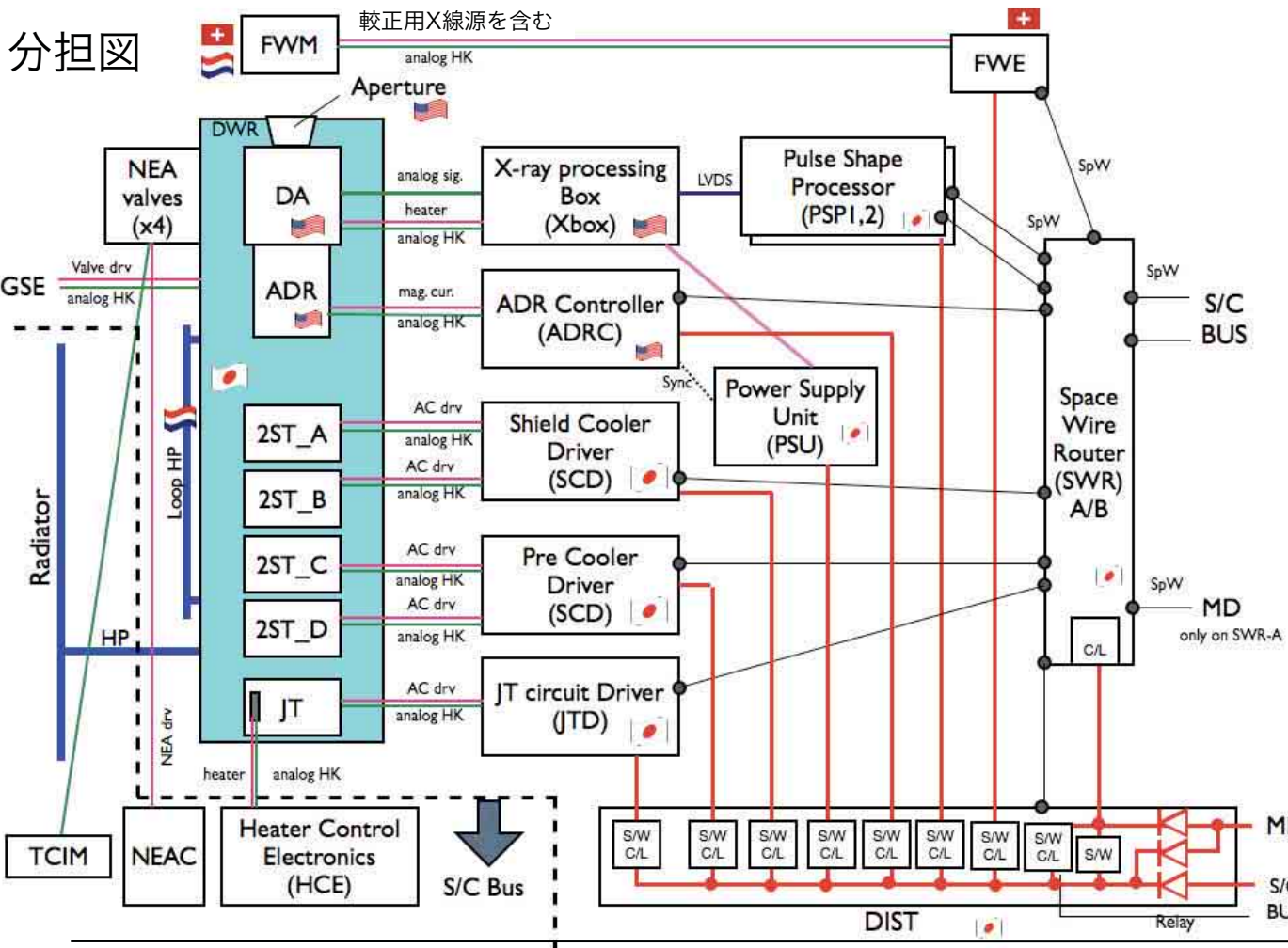


4-26. 軟X線分光検出器 (SXS) [3/5]

SXSの開発方針 (2)

世界の宇宙用マイクロカロリメータの研究者の力をあわせて開発を行う。

そのため、日本が強いリーダーシップを保った上で、ISAS/JAXA, NASA/GSFC, SRON (ジュネーブ大学の研究者を含む) と、世界のトップレベルの研究者の総動員態勢で臨む。NASAの主たる貢献項目。



- 米国: NASAの主たる貢献。極低温部の断熱消磁冷凍機、センサ、X線入射窓、センサと断熱消磁冷凍機の駆動エレクトロニクスを担当。
- 欧州: フィルタホイール、機上較正用X線源を担当
- 日本: デュワー、デジタル信号処理系、機械式冷凍機駆動エレクトロニクス、など残り全てを担当。

毎週TV会議を行い、進捗状況と問題点を議論。

デジタルデータ処理部においては他のミッション機器との共通を最大限はかる事で高信頼化。