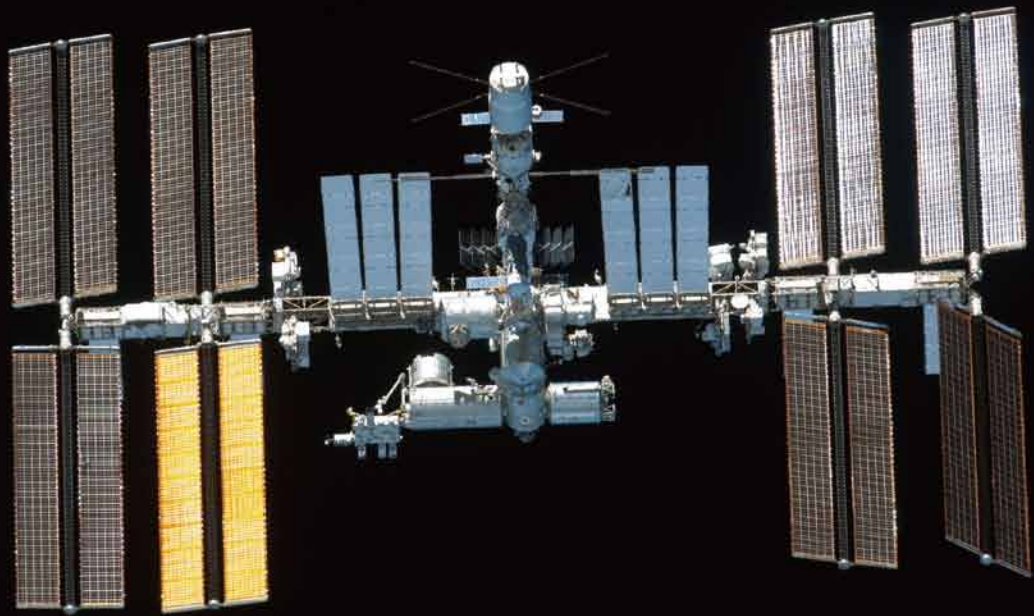


宇宙線と暗黒物質の謎に迫る
Closing in upon the mysteries of dark matter and cosmic-ray acceleration



私たちの目で見える宇宙は一見穏やかに見えますが、実は目に見えない電磁波や高いエネルギーを持った宇宙線が激しく飛び交うダイナミックな空間です。

近年の観測技術の発達により、従来観測が難しかった宇宙線（ニュートリノや電子、陽子・原子核といった宇宙から飛来する粒子）もとらえられるようになり、宇宙の未解決問題を解くカギとして期待されています。

高エネルギー電子、ガンマ線観測装置（CALET）は、日本で初めての宇宙空間における本格的宇宙線観測プロジェクトです。2014年に宇宙ステーション補給機「こうのとり」J5号機（HTV5）で国際宇宙ステーション（ISS）に運ばれ、2～5年間にわたって一次宇宙線観測を行います。

CALETは、最新の検出・電子技術を用いた「カロリメータ」と呼ばれる装置を搭載し、宇宙を飛び交う粒子のエネルギー量、粒子の種類、到来方向を測定します。

この観測によって、宇宙線の発見以来100年を経た現在でも未解明な高エネルギー宇宙線の加速・伝播のメカニズムや、暗黒物質の探索、ガンマ線バーストの解明等、世界に先駆けた新発見が期待されています。

宇宙線を加速する天体 Celestial bodies accelerating cosmic rays

超新星残骸 Supernova remnants
パルサー Pulsars
活動銀河核 Active galactic nucleus



宇宙からの放射線「宇宙線」
Cosmic rays = Radiation from space

暗黒物質 Dark matter

陽電子 Positrons
陽子 Protons
電子 Electrons
ガンマ線 Gamma rays
暗黒物質 Dark matter



国際宇宙ステーション
International Space Station
CALET

CALET相乗りミッション CALET Piggybacked Missions

CIRC 地球観測用小型赤外カメラ
Compact Infrared Camera

人の監視の難しい地域の
森林火災を検知する

地球温暖化や気候変動に影響を及ぼすと考えられ、東南アジア諸国などで深刻な問題になっている森林火災を検知することを主目的とした赤外線センサーです。小型で軽量、かつ低消費電力で、複数の衛星に搭載することで、高頻度の観測が可能になります。

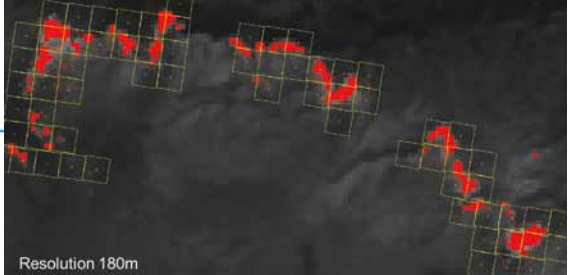
2013年度に打ち上げ予定の「ALOS-2」にも搭載され、観測頻度の向上が期待されています。森林火災の被害・影響を最小限に抑え、火山災害の把握や都市計画へ貢献することを最終目標としています。



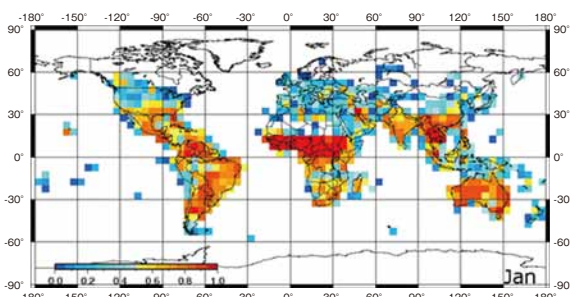
地球観測用小型赤外カメラ CIRC

Detecting forest fires in regions hard for humans to monitor

This is an infrared sensor primarily intended for detecting forest fires, which present a serious problem for the various countries of Southeast Asia, particularly considering the effects of global warming and climate change. Lightweight, compact, and with low power consumption, these can be mounted on multiple satellites to enable high-frequency observation. CIRC will be installed on the ALOS-2 satellite to be launched in 2013, as well as CALET, and is expected to increase observation frequency. The ultimate goal of this technology is to minimize the damage and impact caused by forest fires, as well as contributing to urban planning and our understanding of volcanic disasters.



ASTERデータをもとにしたCIRCの火災検知シミュレーション画像
Image of CIRC fire detection simulation based on ASTER data



光学センサMODISがとらえた世界の森林火災分布
World distribution of forest fires as reported by MODIS optical sensor

主な仕様

Main specifications

項目 / Item	主な仕様等 / Main specifications
ミッション機器 / Mission equipment	CAL: Calorimeter CGBM: Gamma-ray Burst Monitor
打ち上げ時質量 / Quantity at launch	650kg (最大 : Maximum)
寸法 / Dimensions	1,000mm(高さ : Height)×800mm(幅 : Width)×1,850mm(奥行 : Depth)
打ち上げ機 / Launch vehicle	宇宙ステーション補給機「こうのとり」J5号機 (HTV5) (H-II Bロケット)
打ち上げ時期 / Launch period	2014年度 (TBD) : JFY 2014 (TBD)
観測期間 / Observation period	2年間 (5年間目標) : 2 years (5-year target)
消費電力 / Power consumption	650W
通信速度 / Communications speed	中速系 Medium rate data line : 300 kbps 低速系 Low rate data line : 20 kbps

高エネルギー電子、ガンマ線観測装置(CALET)の打ち上げ

Launch of CALET apparatus for observing high-energy electrons and gamma rays



実施チーム

■研究代表者: 早稲田大学 鳥居祥二 ■装置開発: JAXA / 早稲田大学 ■参加機関: 神奈川大学、青山学院大学、横浜国立大学、芝浦工業大学、立命館大学、東京大学宇宙線研究所など



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙ステーションきぼう広報・情報センター

〒305-8505

茨城県つくば市千現2丁目1-1 筑波宇宙センター

TEL : 050-3362-3202 FAX : 029-868-3950

JAXA ウェブサイト
<http://www.jaxa.jp/>

高エネルギー電子、ガンマ線観測装置 (CALET) のホームページ
<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/efuse/calet20100414.html>



高エネルギー宇宙線の謎を解明し、
未知の暗黒物質に迫る



高エネルギー電子、ガンマ線観測装置

CALET

CALorimetric Electron Telescope

宇宙科学のフロンティアに挑む宇宙線天文台

—高エネルギー電子、ガンマ線観測装置(CALET)—

宇宙には、光による観測だけでは調べることのできない多くの謎があります。私たちの住む地球からそれほど遠くない天の川銀河の中でも、まだ解明されていない現象が起きています。それらの現象により、人工では作り出すことが困難な高いエネルギーを持った粒子が生み出され、地球まで飛んで来ていることが知られています。これらの「宇宙線」を観測することにより、宇宙で起きている目には見えない現象を解き明かす手がかりとなると考えられています。

地球に飛来する宇宙線のうち、エネルギーの低いものは太陽からやってくることが知られていますが、よりエネルギーの高いものは太陽系外からやっています。これらは主に、超新星爆発によって加速されていると考えられていますが、実際の加速メカニズムはまだ不明な点が多く、宇宙における謎の一つとなっています。

また、さらに未解明な問題として、暗黒物質の存在があります。これまで行われてきた銀河の回転速度や重力レンズ効果、宇宙マイクロ波背景放射等の観測から、宇宙を構成する成分のうち、我々が観測できるものはわずか5%であり、残りの24%は正体不明の暗黒物質であり、71%は暗黒エネルギーで占められていると考えられています。(図1)この暗黒物質とは、光を出さない未知の物質であり、存在は確実ながら観測が困難なため、その正体はまだ明らかにされていません。しかし、その正体は未発見の重い素粒子であると考えられており、暗黒物質が消滅する際に発生する高エネルギーの粒子が宇宙線として銀河内を飛び交っている可能性があります。

これまで、高エネルギー宇宙線の観測として、気球を使った観測、高山での観測、人工衛星による観測等が行われて来ましたが、地球に飛来する高エネルギー宇宙線をかつてない精度で詳細に調べることによって、このような宇宙に存在する謎の現象に迫ることができます。

JAXAと早稲田大学等によって開発されている高エネルギー電子、ガンマ線観測装置(CALET:CALorimetric Electron Telescope)は、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームで、高エネルギー宇宙線を観測します。

CALETは、日本・アメリカ・イタリアの協力の下、CERN(欧州合同原子核研究機構)における予備実験等を踏まえて開発された、シャワー粒子の位置検出が可能なカロリメータを搭載しています。宇宙線がカロリメータ内部で引き起こす「シャワー粒子」の飛跡を可視化することにより、高エネルギー宇宙線を精密に測定することが可能となり、

- ①高エネルギー宇宙線の起源と加速のメカニズム
- ②宇宙線が銀河内を巡るメカニズム
- ③暗黒物質の正体

等の多くの宇宙の謎を解明しようとしています。

CALETのカロリメータは従来の方法では観測困難であった高エネルギー領域を探ることが可能な性能を持ち、その成果が世界中の研究者から期待されています。

Apparatus for observing high-energy electrons and gamma rays (CALET)

The universe contains many mysteries that cannot be examined by visible-light observation alone. Even within the Milky Way, not far from the Earth upon which we live, as-yet-inexplicable phenomena are occurring. It is known that these phenomena result in the creation of high-energy particles, quite difficult to artificially produce, which bombard the Earth. It is believed that measuring these 'cosmic rays' will offer clues to unraveling such phenomena occurring in the vicinity of Earth that are invisible to the naked eye.

Of the cosmic rays that bombard the Earth, it is known that those of lower energy originate from the sun, with those of higher energy coming from outside the solar system. Although believed to be primarily accelerated by supernovas, the actual acceleration mechanism has not been elucidated; this remains one of the mysteries of the universe.

Additionally, a further unresolved issue is the existence of dark matter. As a result of prior observations of the cosmic microwave background radiation, gravitational lensing, galactic rotation speed etc., it is believed that of the components making up the universe, those which we are able to observe only represent 5%. Unidentified dark matter makes up 24% of the remainder, with the final 71% believed to be occupied by dark energy (Figure 1). This dark matter is an unknown substance that does not emit light; because its direct observation is difficult, its identity has not yet been clearly ascertained. However, it is believed to be an as-yet-undiscovered massive elementary particle, and it is possible that the high-energy particles generated when dark matter particles are annihilated are passing through our galaxy as cosmic rays.

Up to now, observations have been conducted using balloons, or in alpine areas, or using satellites. As a result of the unprecedented precision and detail with which the high-energy cosmic rays arriving at the Earth can be now observed, we are closer than ever before to unraveling the mysterious phenomena of the universe.

The CALET (CALorimetric Electron Telescope) apparatus for high-energy electron and gamma-ray observation developed by JAXA and Waseda University, etc. will be mounted to an exposed facility on Japan's Kibo laboratory aboard the International Space Station (ISS), in order to observe high-energy cosmic rays.

CALET is equipped with a calorimeter developed in conjunction with Japan, USA, and Italy, which has been developed following beam tests conducted at CERN (the European Organization for Nuclear Research). Imaging the trajectories of 'shower particles' triggered inside the calorimeter by cosmic rays should enable precision measurement of high-energy cosmic rays, furthering attempts to unravel various mysteries of the universe, such as:

- ①the origin and mechanisms of acceleration of high-energy cosmic rays
- ②the propagation mechanism of cosmic rays throughout the galaxy
- ③the identity of dark matter.

CALET's calorimeter has the capability to explore high-energy regions difficult to observe using conventional methods, and researchers around the world have high hopes for the results.

CAL CALorimeter

CALETミッションのメイン検出器

カロリメータ

■カロリメータの構造

カロリメータは3つの検出器を積み重ねた構造となっており、それぞれの検出器から得られるシャワー粒子の飛跡についての情報を組み合わせることにより、入射してきた宇宙線についての到来方向や種類などの異なるデータを取得します。(図2)

上段:電荷測定器(CHD)は、入射粒子の電荷を測定し、原子核成分の原子番号を特定します。

中段:イメージングカロリメータ(IMC)は、1mm角のシンチレーティングファイバーを用いることでシャワー初期発達段階での粒子飛跡を検出し、宇宙線の電荷や到来方向などを精密に測定します。

下段:全吸収型カロリメータ(TASC)は、密度と原子番号が大きいタングステン酸鉛結晶シンチレータ(PWO)(図3)によりシャワーを全吸収し、シャワーの発達の様子やエネルギーを計測します。

■カロリメータ内での宇宙線シャワーの様子

高エネルギー宇宙線粒子がCHD→IMC→TASCと通過する過程でカロリメータ内で発達するシャワーの見え方は、入射宇宙線の種類によって異なります。(図4はコンピュータシミュレーションによって得られたガンマ線(10GeV)、電子(1TeV)、陽子(10TeV)のシャワー粒子の飛跡です)

事前にコンピュータシミュレーションによって予測されたシャワーパターンと実際の観測データを照合することで、粒子の種類やエネルギーの大きさといった、観測された宇宙線の詳細な情報を得ることができます。

■Structure of the Calorimeter

The calorimeter structure is composed of three stacked detectors. By combining the particle shower trajectory data obtained from each detector, the characteristics of incoming cosmic rays, such as type of particle, arrival direction, etc. are acquired. (Figure 2)

Upper: The charge detector (CHD) measures the charge of the incident particle and identifies the kind of nucleus.

Center: The imaging calorimeter (IMC) detects the particle trajectories in the early stage of shower development using 1mm square scintillating fibers, and performs precision measurement of the charge and arrival direction of cosmic rays.

Lower: The total absorption calorimeter (TASC) uses a high-density, high-atomic-number lead tungstate crystal scintillator (PWO) (Figure 3) to totally absorb the shower particles and measure the shower development, and determine the incident particle energy.

■The state of cosmic ray showers inside the calorimeter

As the high-energy cosmic ray particles pass through the CHD/IMC/TASC, the appearance of the shower particles developing inside the calorimeter depends on the type of incoming cosmic rays. (Figure 4 shows samples of the shower particle trajectories by gamma-rays (10GeV), electrons (1TeV), and protons (10TeV) obtained by computer simulation.)

By matching the actual observed data with the shower pattern predicted by the prior computer simulation, detailed information about the observed cosmic rays can be obtained, such as the types of particles involved and the magnitude of energy.

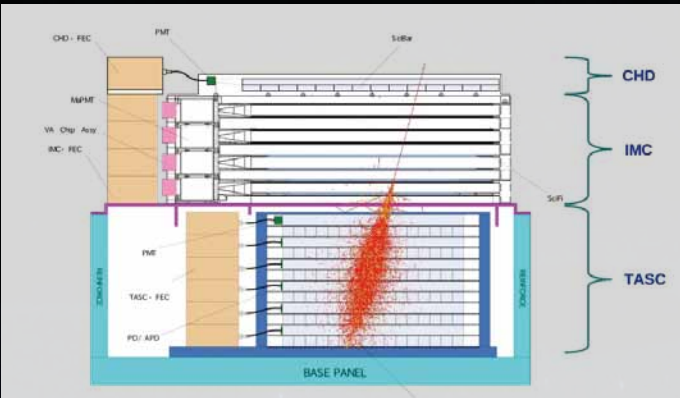


図2: カロリメータの構造とシャワー粒子

Figure 2: Calorimeter structure & shower particles



図3: タングステン酸鉛結晶シンチレータ(PWO)

Figure 3: Lead tungstate crystal scintillator (PWO)

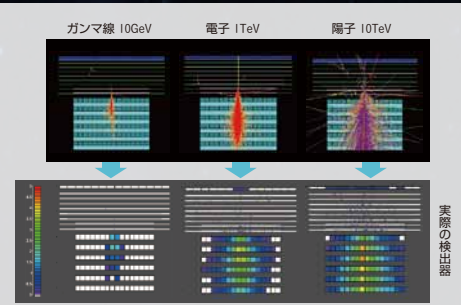


図4: 宇宙線の種類とシャワーの様子

Figure 4: Types of cosmic rays & shower particles

CGBM Gamma-ray Burst Monitor

CALのガンマ線観測機能を補強する

ガンマ線バーストモニタ

ガンマ線バーストは、ガンマ線が数ミリ秒から数百秒にわたって閃光のように放出される天体現象です。この現象は天球上のランダムな位置で発生し、一日に数回発生しています。1960年代に初めて観測された現象であり、大部分のものについては、大質量星が死を迎える瞬間に放射されるガンマ線を観測していると考えられていますが、継続時間が2秒にも満たないガンマ線バーストについては中性子星同士、もしくは中性子星とブラックホールの衝突・合体によるという説が有力です。ただし、その詳細な発生機構についてはまだ明らかになっていません。

CGBMは2台の硬X線モニタ(HXM)と1台の軟ガンマ線モニタ(SGM)の3台の検出器で構成されており、いずれもシンチレータと光電子増倍管を用いています。

シンチレータとして、HXM用には高性能な臭化ランタン(LaBr₃)、SGM用にはゲルマニウム酸ビスマス(BGO)という2種類の結晶が使われており、CGBM全体で7キロ電子ボルトから20メガ電子ボルトまでの広範囲な波長のX線及びガンマ線を観測できます。(図7参照)

また、メイン検出器であるカロリメータとの同時検出により、従来観測された最大エネルギーである40ギガ電子ボルトを超える高エネルギーガンマ線の検出も狙っています。

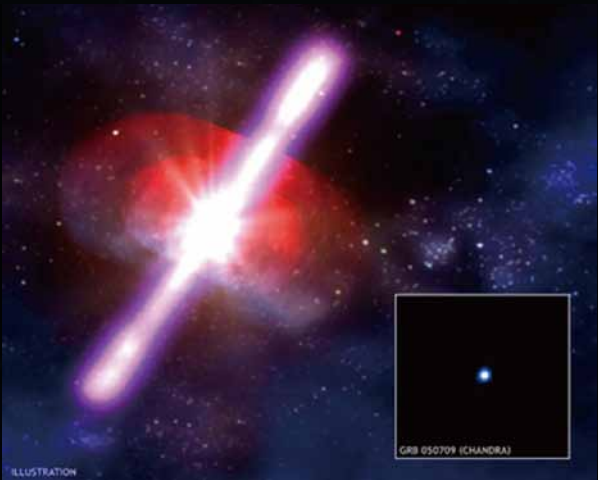
発生したガンマ線バーストの発生時刻と発光の変動パターンは、現在きぼう船外実験プラットフォームで運用中の全天X線監視装置(MAXI)と同様に全世界に向けて速報する予定であり、速報をもとに、2010年代後半に本格稼働する重力波望遠鏡や、地上の望遠鏡、MAXIなどと連携観測することでガンマ線バーストの謎を解明することが期待されています。

Gamma-ray bursts are a celestial phenomenon whereby gamma rays are released as a flash lasting several milliseconds to several hundred seconds. Occurring in random positions around the celestial sphere, this phenomenon occurs several times per day. Observed for the first time in the 1960s, it has been suggested that this phenomenon is usually caused by the collapse of a massive star. The duration of gamma-ray bursts is less than 2 seconds, and the leading theory suggests they are caused by collision/coalescence between two neutron stars, or between a neutron star and a black hole.

However, details of the origin and nature of gamma-ray bursts are not yet clear.

The CGBM is composed of three detectors: two Hard X-ray Monitors (HXM) devices and one Soft Gamma-ray Monitor (SGM) device, all of which utilize a photomultiplier tube and a scintillator. Two types of crystals are used as scintillators: lanthanum bromide (LaBr₃) for the HXM and bismuth germanate (BGO) for the SGM. The entire CGBM array is capable of measuring X-ray and gamma-ray wavelengths over a wide range from 7 kilo-electron volts up to 20 mega-electron volts. (See Figure 7) Additionally, alongside the simultaneous detection by the prime CAL instrument, CGBM also seeks to detect high-energy gamma-rays at regions over 40 giga-electron volts: the maximum energy ever observed by conventional means.

The variation patterns and times of occurrence of gamma-ray bursts are planned for instant transmission around the entire world in the same way as MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image), currently operating on Kibo exposed facility. Based on this preliminary information, if the CGBM can coordinate observation with ground-based telescopes, with MAXI, and with the gravitational wave telescopes expected to enter full-scale operation in the late 2010s, it should be possible to unravel the mystery of gamma-ray bursts.



©X-ray:NASA/CXC/Callech/D.Foxetal.; Illustration: NASA/D.Berry

図6:X線観測衛星「チャンドラ」が捉えたショート・ガンマ線バーストGRB050709(右下)と、その想像図

Figure 6: Short gamma ray burst GRB050709 captured by the Chandra X-ray observation satellite (pictured at lower right), together with an artist's illustration.



左:臭化ランタン 右:光電子増倍管

Left: Lanthanum bromide Right: Photomultiplier tube

図7:X線やガンマ線が入射するとその波長に応じた微弱な光を発生するシンチレータ。X線やガンマ線がシンチレータに入射して発した光を光電子増倍管で増幅し、電気的伝信号として出力することで、ガンマ線バーストを観測します。臭化ランタンをX線、ガンマ線天体観測用として用いるのは世界で初めての試みです。

Figure 7: A scintillator generates faint light in response to the wavelength of incoming X-rays and gamma rays. A photomultiplier tube amplifies the light emitted when X-rays and gamma rays enter the scintillator, and outputs this as an electrical signal to measure gamma-ray bursts. This is the first attempt ever to use LaBr₃ crystal in space for celestial gamma-ray observations.

■ CALET構成機器

CALETのミッション機器としては、メインミッションのカロリメータ(CHD、ICM、TASC)の他、付加ミッションとして、硬X線観測装置(HXM)2台、軟ガンマ線観測装置(SGM)1台から構成されるガンマ線バーストモニタ(CGBM)、相乗りミッション機器としてコンパクト赤外線カメラ(CIRC)も搭載されています。

ミッション機器のサポートセンサとして、時刻測定用にGPS受信機(GPSR)、姿勢決定用にスターセンサ(ASC)が搭載されています。

CALET内部には、各機器への電源供給、通信制御を行うミッションデータ処理装置(MDC)があります。また、カロリメータに必要な高電圧を供給するため、イタリア宇宙機関(ASI)により開発・提供される高電圧電源箱(HV BOX)が搭載されています。

外部との機械的インタフェースとしては、きぼうロボットアームによるハンドリング用のFRGF、きぼう船外曝露部との結合機構であるPIU、打ち上げ時に「こうのと」曝露バレットに搭載するためのHCAM-Pがあります。

PIUには電源、通信、流体の各インタフェースコネクタが内蔵されており、きぼう曝露部から電源供給、通信制御、フロリナートによる排熱機能のサービスが提供されます。

■CALET Mission Equipment

Aside from the main mission calorimeters (CHD, IMC, TASC), CALET is also equipped with auxiliary mission equipments, including a Gamma-Ray Burst Monitor (CGBM) composed of two Hard X-ray Monitors (HXM) and one Soft Gamma-ray Monitor (SGM), as well as a Compact Infrared Camera (CIRC). Sensors supporting these mission equipments include a GPS receiver (GPSR) for time measurement and a star sensor (ASC) for attitude determination. Inside CALET is a mission data controller (MDC) which manages the power supply to each device, as well as communications control. Additionally, in order to supply the high voltages required by the calorimeters, CALET is equipped with a high-voltage power supply box (HV BOX) developed and provided by the Italian Space Agency (ASI). As a mechanical interface with other systems, CALET is equipped with a FRGF for manipulation by Kibo robot arm, a PIU serving as an interface mechanism with Kibo exposed facility, and a HCAM-P for mounting on the Kounotori-5(HTV-5) exposed pallet at time of launch. The PIU has interface connectors for all of the necessary power, communications, and fluid supplies. Services such as power supply, communication control, and active thermal control functions via Fluorinert are supplied from Kibo exposed facility.

■CALETが挑戦する科学観測ミッション Scientific Observation Challenges of the CALET Mission

■ 目的	Objectives	■ 観測内容・方法	Details & Methods of Observation
宇宙線加速天体の探索	The search for celestial bodies accelerating cosmic rays	地球近傍の超新星の残骸などから飛来する、テラ電子ボルト以上のエネルギーを持つ電子の測定	Measurement of electrons in the vicinity of the Earth originating from supernova remnants, at energies of tera-electron volts or higher.
暗黒物質の探索	The search for dark matter	暗黒物質が対消滅や崩壊をしたときに発生する100ギガ電子ボルト～10テラ電子ボルト程度の電子・ガンマ線の観測	Observations of electrons and gamma-rays generated by dark matter annihilation and decay, ranging from about 100 giga-electron volts to 10 tera-electron volts.
宇宙線の発生・加速メカニズムの研究	Research on the origin and acceleration mechanism of cosmic rays	地球に到来する電子・陽子・原子核(鉄以上の超重核含む)の、ギガ電子ボルトからペタ電子ボルトに及ぶ広範囲の測定	Measurements of a wide energy range of electron, positrons, and proton-nuclei (including superheavy nuclei above iron) coming to earth, from the giga-electron volt range to the peta-electron volt range.
宇宙線の銀河内伝播メカニズムの研究	Research on the propagation mechanism of cosmic rays within the galaxy	超新星爆発で放出される核種(炭素など)と、それらが銀河空間で破砕して生じる二次的核種(ホウ素など)の存在比の測定	Measurements of the abundance ratio of nuclides released in supernova explosions (such as carbon) to secondary nuclides (such as boron) produced through their disintegration in galactic space.
太陽磁気圏の研究	Observations of the solar magnetosphere	太陽磁場の影響を受ける、10ギガ電子ボルト以下の電子の到来量時間変動の観測	Observations of time dependence of the amount of arriving electrons at 10 giga-electron volts and below, affected by the solar magnetic field.
ガンマ線バーストの研究	Research on gamma-ray bursts	CAL及びCGBMによる、7キロ電子ボルト～10テラ電子ボルトに渡る幅広いエネルギー領域におけるエクス線及びガンマ線の突発現象の観測	Observations of transient phenomena in X-rays and gamma rays over broad energy regions ranging from 7 kilo-electron volts to 10 tera-electron volts conducted using CAL and CGBM.

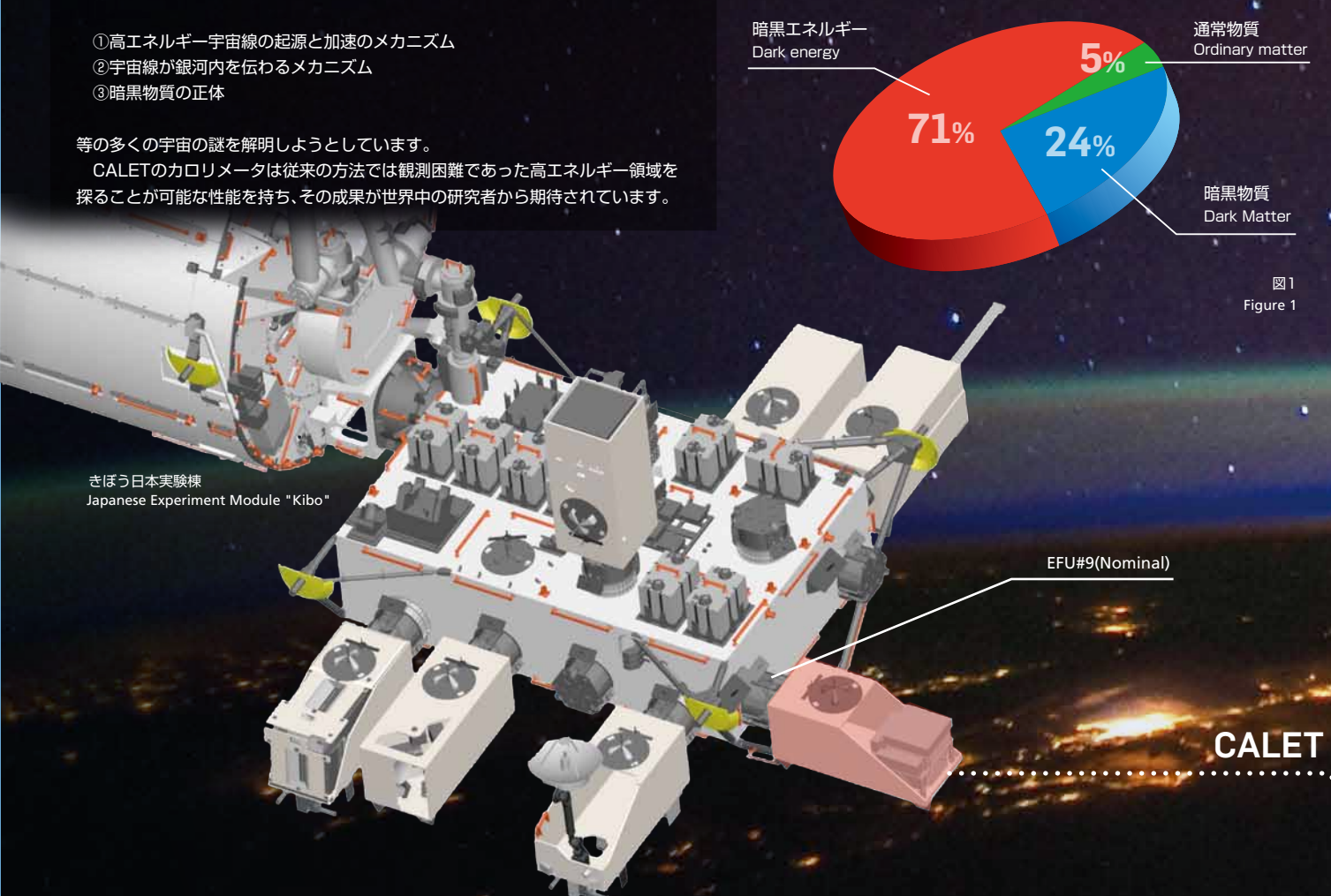


図1

Figure 1

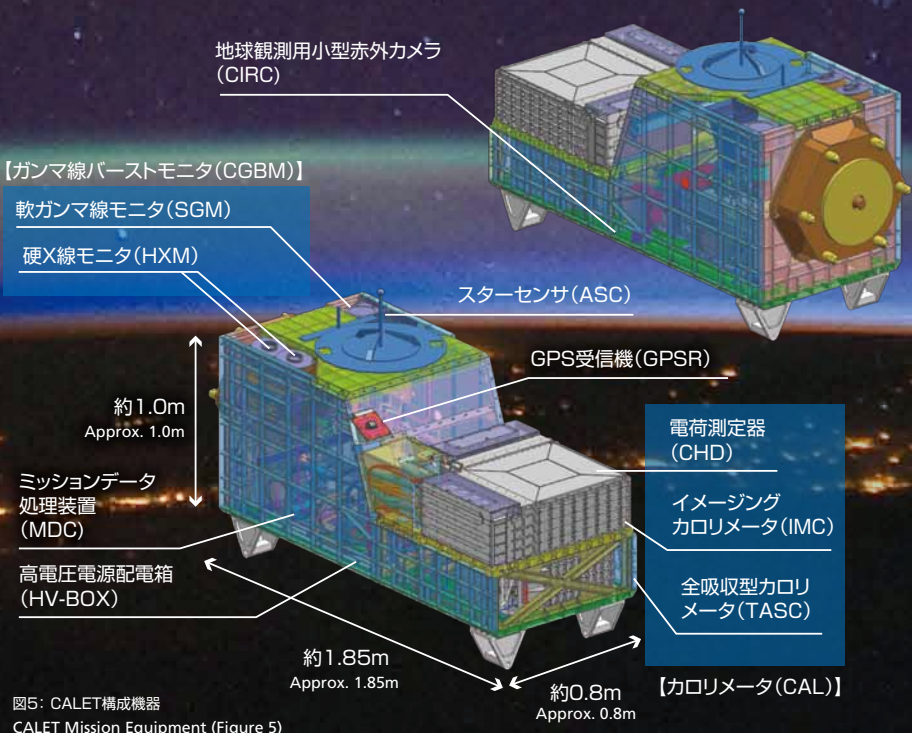


図5: CALET構成機器

CALET Mission Equipment (Figure 5)