

# The Genesis Discovery Mission: Return of Solar Matter to Earth

D. S. Burnett, B. L. Barraclough, R. Bennett, M. Neugebauer, L.P. Oldham, C. N. Sasaki, D. Sevilla, N. Smith, E. Stansbery, D. Sweetnam, and R. C. Wiens,  
*Space Sci. Rev.*, 105, 509-534, 2003

担当者 寺田香織

# The Genesis Discovery Mission

## ミッション

NASAによるディスカバリー計画の5番目のミッション

## 目的

太陽風のサンプルリターンによる太陽の同位体組成及び元素組成の解明

## 衛星

太陽指向スピン安定姿勢制御

太陽風の"regime" (高速太陽風、低速太陽風、CME) 別の試料収集アレイ

## SRC

地球に帰還させる試料回収カプセル  
地球大気への再突入後、パラシュートで減速させ、ヘリコプターでひっかけて回収

## 試料収集アレイ

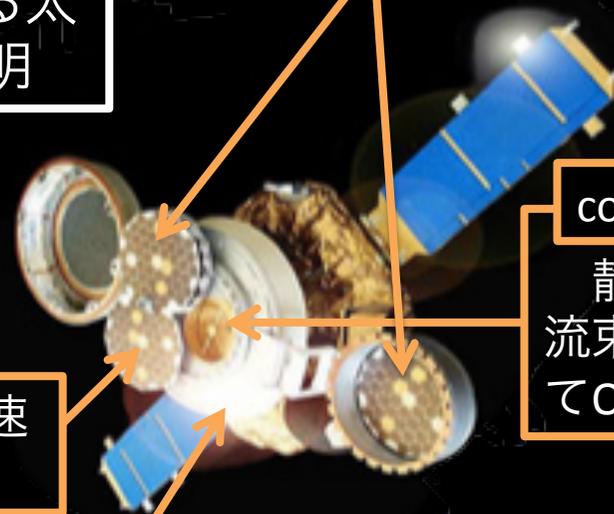
イオンインプラントの要領で太陽風を収集

## concentrator

静電ミラーにより流束量を約20倍にして $O^+$ ,  $N^+$ を収集する

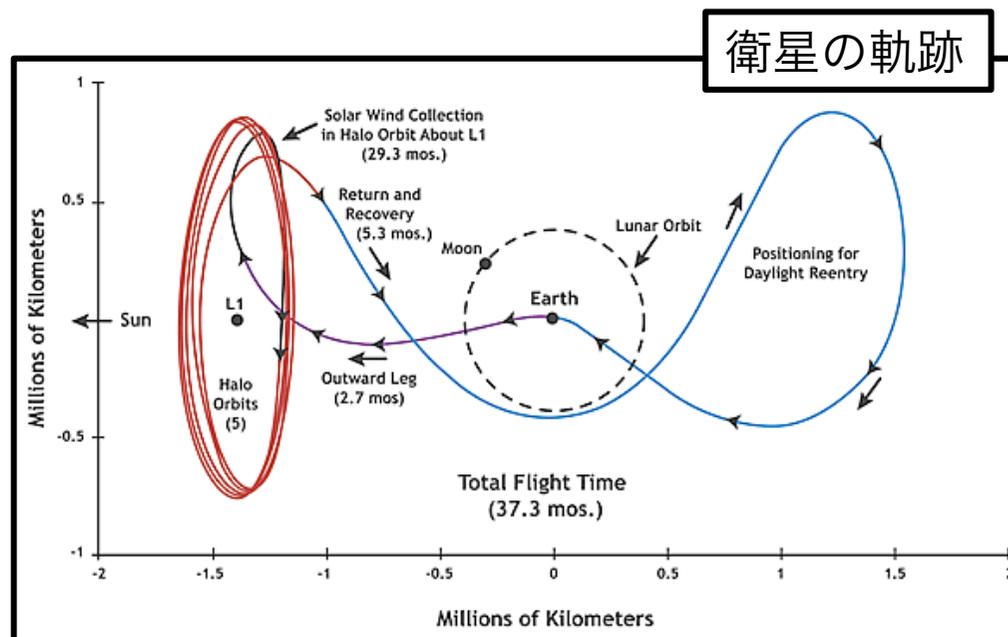
## 静電分析器

太陽風電子とイオンをモニターし、衛星が位置する太陽風のregimeを判定する。



# Genesis ミッションの経過と本論文の発表時期

- 2001年8月8日 ● 打ち上げ
- 2001年11月16日 ● 太陽-地球系L1のハロー軌道に投入
- 2001年12月3日 ● 試料収集開始
- 2003年 ◀ 本論文が発表される
- 2004年4月2日 ● 試料収集完了
- 2004年4月22日 ● 地球への帰還を開始  
日中の SRC 再突入のため一旦 L2 へ。
- 2004年9月8日 ● SRC が地球に帰還。パラシュートが開かず地面に激突し、データの一部が損傷。
- 2004年9月15日 ● 無事だった太陽風試料が国際学術機関に配られ、解析が始まる



- 本論文が書かれた時点では、まだ試料は地球に持ち帰られていない。
- 本論文では、科学原理とミッションの技術的アプローチがまとめられている。

## 2. Science Background

### Genesis の目標

太陽物質の同位体組成・元素組成を求めることで、太陽系形成過程と原始太陽系星雲物質の解明を目指す。

- 何故『太陽物質の同位体組成・元素組成を求めること』が『太陽系形成過程と原子太陽系星雲物質の解明』になるのか？
    - 惑星物質や天体は、組成が均一な原始太陽系星雲から形成された。
    - 太陽内部での核融合に用いられる D や Li の同位体は例外だが、太陽光球内は原始太陽系星雲の元素組成が保たれている。
    - 質量の違いによる物理化学過程での同位体分別（0.1% 以下）は生じているが、地球や太陽も含めて太陽系全体において同位体組成はほぼ等しい。
- と考えられるため。（惑星物質の起源に関する標準モデル）

\* 太陽と地球等の同位体組成・元素組成を比較することで、標準モデルの検証が可能。

## 2. Science Background

- 太陽物質の収集方法
  - 収集器（ウエハー）への太陽風イオンのインプラント
    - ウエハーには超高純度バルク（シリコン、アルミニウム、ダイヤモンド、サファイア等）を使用 [Jurewicz et al., 2003]
      - ウエハーに含まれる不純物は、太陽風から収集される積算量の10%以下でなければならない
      - 太陽風の各元素の採取には異なるウエハーが用いられる。
        - » 太陽風には元素周期表のほとんどの元素が含まれる。
- 先行研究
  - Apollo 計画の一連のミッションで金属箔（錫）による太陽風の収集が行われた。
    - He, Ne,  $^{36}\text{Ar}$  のサンプルを得た。
    - 金属箔の純度が低かったため、その他の元素は金属箔の不純物と太陽物質の区別が困難であった。
    - Genesis では、収集器を太陽風に曝す期間が Apollo 計画の100倍で、さらに収集器の純度を上げた。

### 3. General Science Objectives

- ミッションの目的
  - ① 惑星科学の問題に必要とされる精度で同位体比を求める。
    - 惑星科学では、同位体比の 0.1% の違いが問題となる。
  - ② 太陽系の平均的な化学組成を求める。
    - 太陽系天体の組成の多様性を議論する際の基準となる。
  - ③ 3 種類の太陽風 (“regime”) 各々の組成を求める。
  - ④ 21 世紀の科学に向けて、先端分析技術と共に必要とされる太陽物質に関する試料の蓄積

## 3.1 Solar Isotopic Composition

太陽系物質のサンプル（隕石や地球の物質等）のOやNには、従来の太陽系形成モデルの物理化学過程では説明できない同位体異常がある。

- $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  で約 5%、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  には約 60% の差異
- 原始太陽系星雲の不均一性の反映か？
  - 一方で、OやN以外の元素の同位体組成の変動が 0.01% ~ 0.1% であることは、原始太陽系星雲が均一であったことを示すように思われる。

Genesis では、太陽の O や N の同位体組成を初めて測る

### 原始太陽系星雲の不均一性？

- 太陽系が形成される以前の銀河系において、50 ~ 100 億年もの間に生成された様々な恒星物質から太陽系は形成された。
- この原始太陽系星雲となった恒星物質の同位体組成の差異は大きかった。



恒星物質間の混合があまり進んでいなかったとしたら、太陽系物質の同位体組成に差異があってもおかしくない。

## 3.2 Elemental Abundances

- 太陽の元素存在度の求め方
  - 太陽スペクトルの光球吸収線の解析
    - 誤差（第一標準偏差）は $\pm 10\%$ 程度
    - Li, B, Be 等太陽内部の核融合に関わる元素の存在度は、原始太陽系星雲よりも小さくなっていると考えられる。
    - 測定できない元素がある。
  - CIコンドライトの解析（不揮発性の元素のみ）
    - 最も始原的な隕石グループ
    - 揮発性の元素はCIコンドライトから失われていると考えられる。
    - 太陽スペクトルの解析よりも誤差は小さいが、太陽物質そのものを見ているわけではないので、太陽スペクトルの解析結果と照らし合わせながらの作業になる。

Genesis ミッションでは、太陽スペクトル解析の3倍の精度で、太陽物質から太陽の元素存在度を求める。

## 3.3 Solar Wind Regimes

- 太陽光球は原始太陽系星雲の組成を保持していると考えられる。
- 太陽に探査機を送ることは困難なため、太陽光球から吹き出している太陽風の採取を行う。
- 太陽風から太陽光球の元素組成を求めるには、第一イオン化時間 (FIT) 及びイオンの質量と電荷による元素分別効果を考慮する必要がある。
  - Ulysees, WIND, SOHO, ACE 衛星の結果から得られた元素分別パターンの体系を用いて、太陽風の元素組成を修正する。
  - 太陽風の種類（高速太陽風、低速太陽風、CME）によって、修正の大きさが違う。

太陽風の種類毎に別けて試料を採取する。

- 太陽風と太陽光球間には同位体分別がある可能性もある。
  - 異なる太陽風の種類を比較することにより、同位体変化の過渡変動の痕跡が見えるとの報告がある。[Kallenbach et al., 1999; Kallenbach, 2001]

同位体分別の有無とそのパターンを調べる。

## 4. Examples of Specific Measurements

### 重点目標

- 酸素同位体の計測
  - 隕石に同位体異常が見られる。 [Clayton, 1993; Wiens et al., 1999]
- 窒素同位体の計測
  - 惑星物質に説明不可能な大きな同位体異常が見られる。 [Owen et al., 2001]
- 希ガス同位体及び希ガス元素の計測
  - 地球型惑星大気の組成を説明する基礎。 [Pepin, 1991]

ウエハーの材質の選定やミッションの計画は、重点目標の達成を優先して行っている。

# 4.1 O isotopes

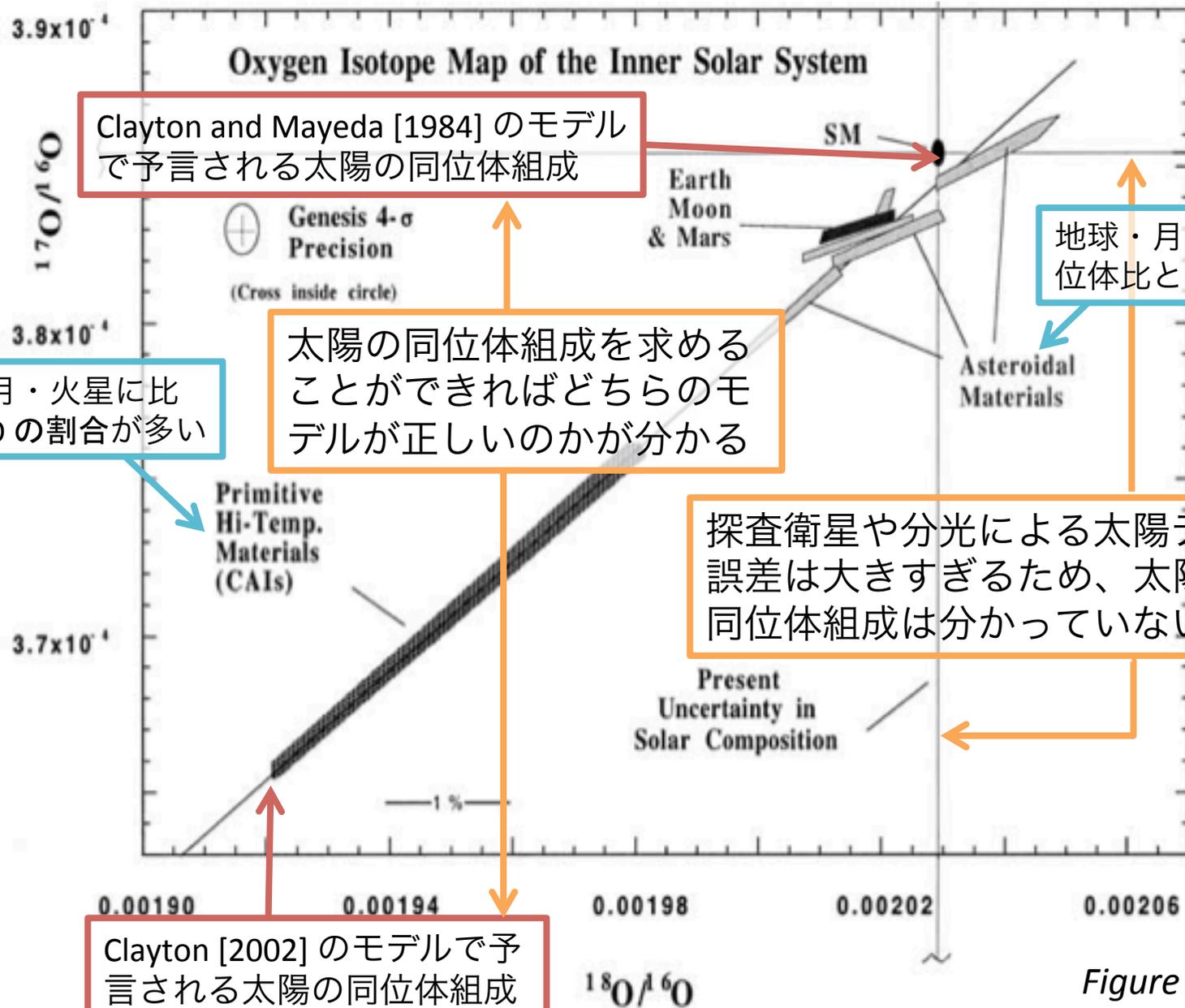


Figure 2. 11

## 4.1 O isotopes

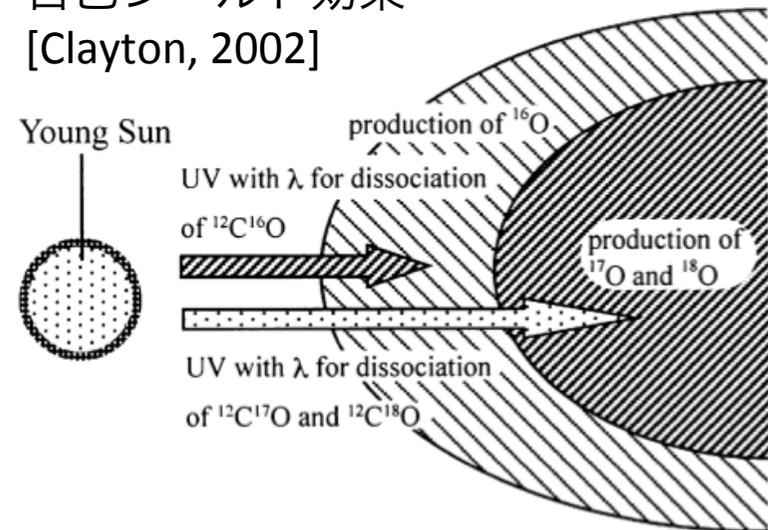
### CAI (Ca-Al-rich inclusion)

- コンドライト中に含まれる高温鉱物の塊
- 太陽系形成初期に高温現象により形成されたと考えられる

### 酸素同位体異常が生じるモデル

- CAI への  $^{16}\text{O}$  に富む太陽系外惑星物質の混入 [Clayton and Mayeda, 1984]
- 原始太陽系星雲における CO 分子の光解離における自己シールド効果 [Clayton, 2002]
- 原始太陽系星雲のガスとダスト間の同位体組成が異なる [Wien et al., 1999]

自己シールド効果  
[Clayton, 2002]



## 4.2 N And Noble Gases

### 希ガス

- Apollo計画で収集された太陽風の試料
  - 太陽風の $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ は地球大気と同位体比よりも 38 % 大きい
    - 地球は大規模な大気散逸を経験し、 $^{22}\text{Ne}$ が濃縮されている。
- 月の土壌の試料
  - 太陽の希ガス元素の組成比は時間変化している。
  - 太陽の希ガス元素の同位体比は変化しない。

# 4.2 N And Noble Gases

## 窒素同位体

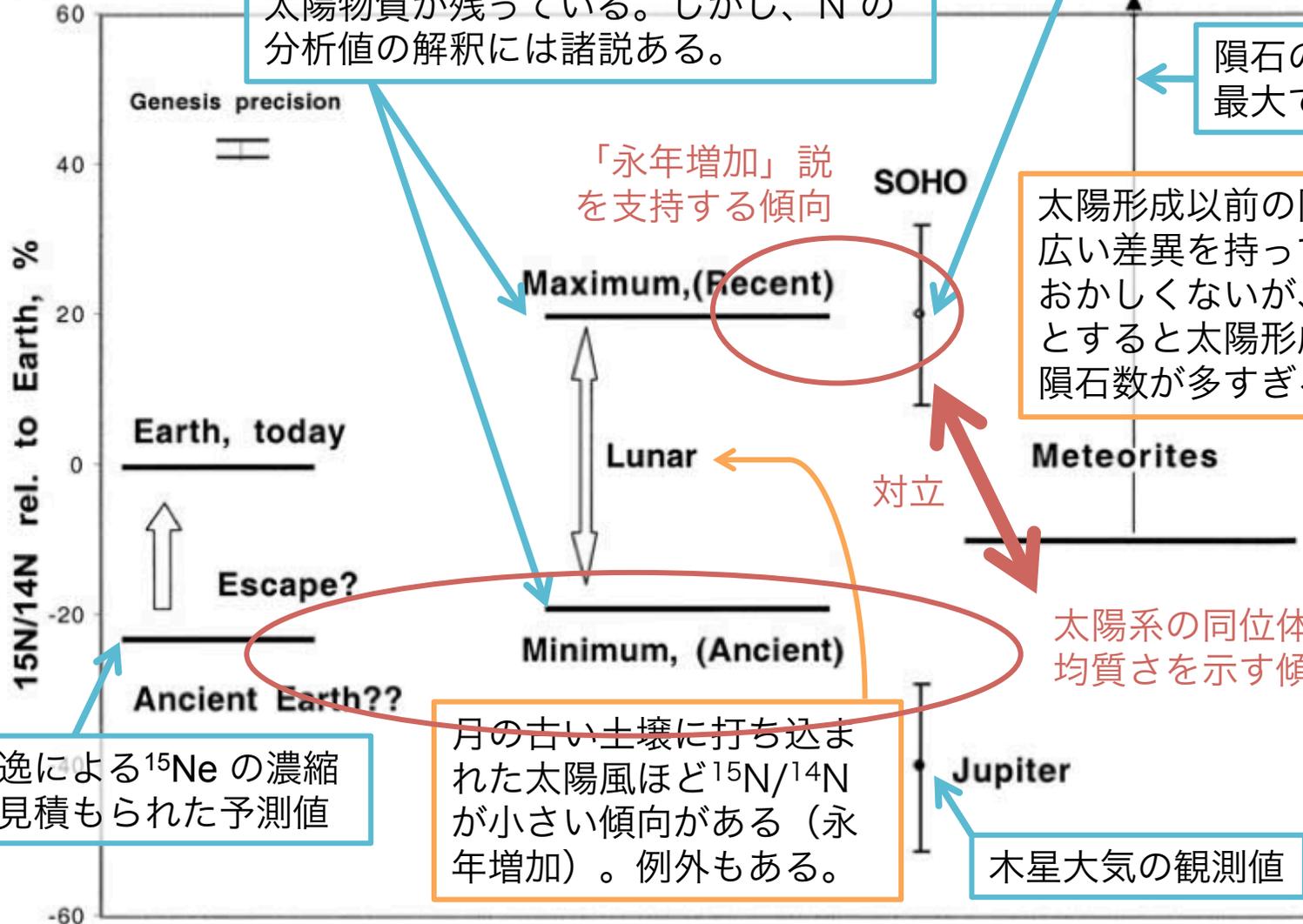
Figure 3.

月の土壌の分析値。火成活動が終了し、表土の変質も少ないため、月の表面には過去数十億年間吹き付けられてきた太陽物質が残っている。しかし、Nの分析値の解釈には諸説ある。

太陽風の直接観測。エラーバーは第2標準偏差

隕石の分析値。最大で+150

太陽形成以前の隕石は幅広い差異を持っていてもおかしくないが、そうだとすると太陽形成以前の隕石数が多すぎる。



大気散逸による<sup>15</sup>Neの濃縮度から見積もられた予測値

月の古い土壌に打ち込まれた太陽風ほど<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>Nが小さい傾向がある（永年増加）。例外もある。

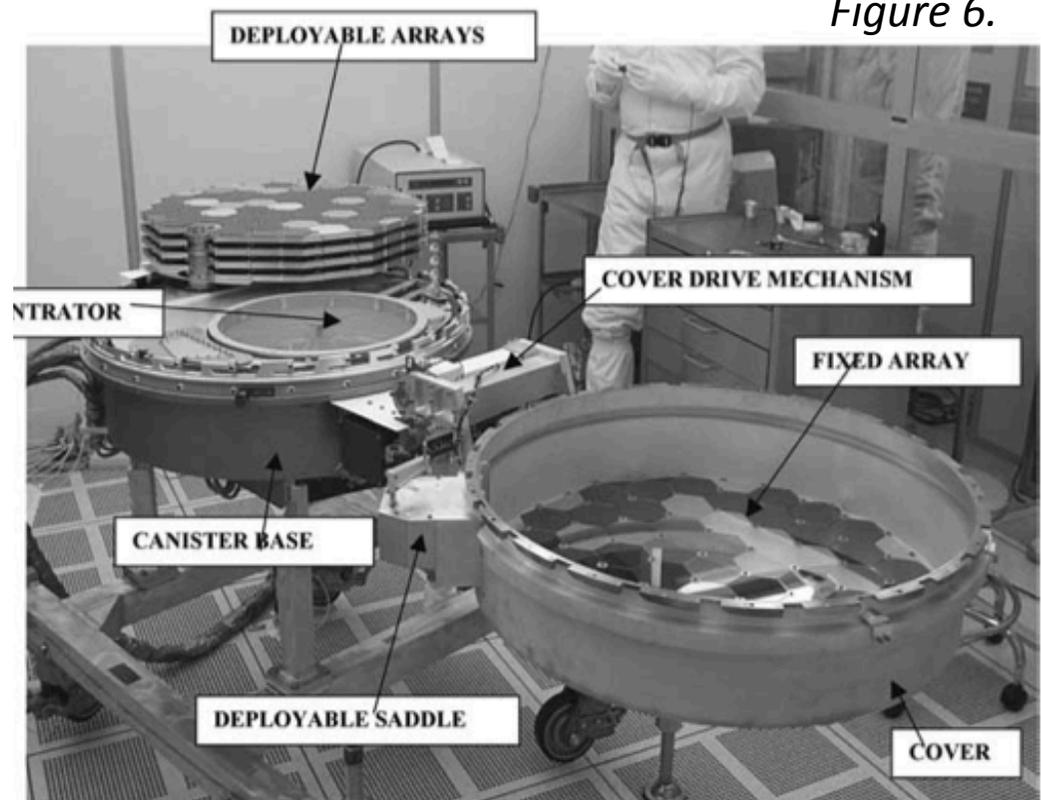
木星大気の観測値

## 5. Analysis Requirements

- 各種元素とその同位体に必要な分析感度は、その元素の太陽風中の流束量（論文中 Table 1）、収集器の汚染度合い、惑星科学での相対的重要性によって決まる。
- Genesis ミッションで持ち帰る試料を解析するためには、収集器の表面から100 nm 程度の深さまでの領域に、 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-6}$  個程度の検出感度が必要。
- 要求精度
  - 元素精度
    - 収集器  $1\text{cm}^2$  辺りの粒子数の第2標準偏差が $\pm 10\%$
  - 同位体精度
    - 地球の物質の同位体比との差異の第2標準偏差が
      - CとN :  $\pm 0.4\%$
      - OとTi :  $\pm 0.1\%$
      - その他 :  $\pm 1\%$
  - $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{126}\text{Xe}$ ,  $^{78}\text{Kr}$  以外の元素では要求精度を満たす。

## 6. Instrumentation Overview

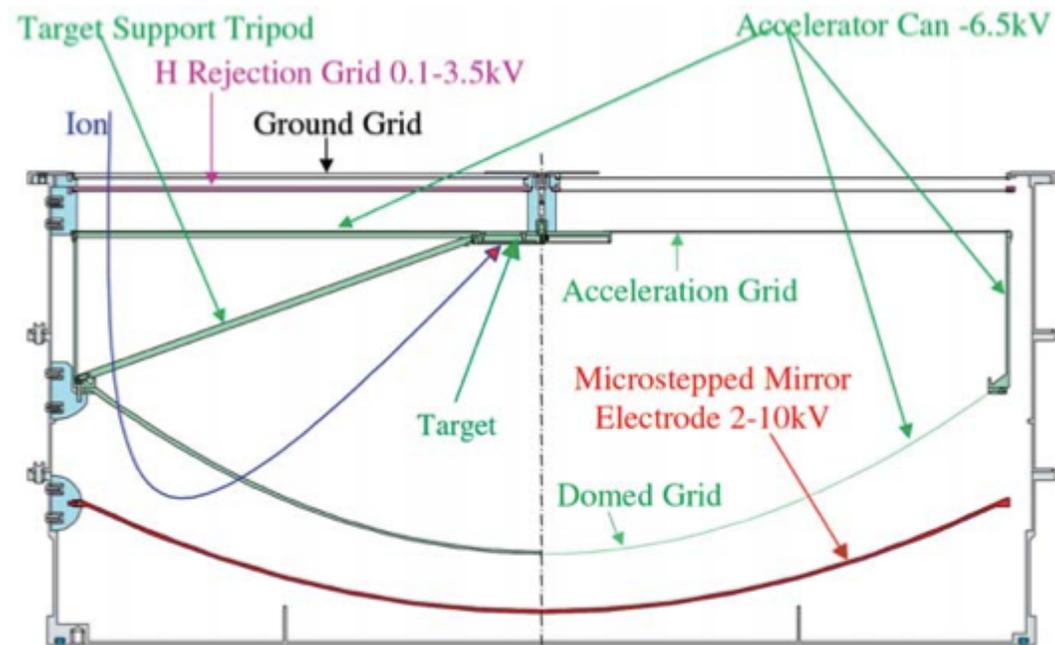
- 収集アレイ
  - 1辺の長さが約10cmの六角形の超高純度収集器 54枚と、六角形の半分の形の超高純度収集器 6枚で構成
  - 組み立てはクラス 10のクリーンルームで行う
  - SRCの中の収納容器に5枚設置されている。
  - 収納容器の蓋の内側に取り付けられたアレイと一番上にあるアレイは常に太陽風に曝されサンプルを採取する。その下の3枚は特定の種類の太陽風のときのみ太陽風に曝しサンプルを採取する。
  - 太陽風試料収集終了後は収納容器内に格納



## 6. Instrumentation Overview

- Concentrator
  - 静電ミラー
  - 収納容器内に設置されている。
  - 質量対電荷比  $2.0 \sim 3.6 \text{ amu } q^{-1}$  の太陽風イオンを反射し、焦点に置かれた超高純度物質のターゲット材に20倍の流束量を集める。
  - ミッションの重点目標であるNとOの同位体の計測のため搭載されている

concentrator の断面図  
[Nordholt et al., 2003]



## 6. Instrumentation Overview

- 静電分析器
  - 太陽風イオンと電子をモニター
  - 衛星のデッキ部分に設置されている。
  - “科学アルゴリズム”により衛星が位置する太陽風の種類（高速太陽風、低速太陽風、CME）を判断し、収集アレイと concentrator に知らせる。
    - 収集アレイ
      - その太陽風種を採取するアレイを太陽風に曝す
    - concentrator
      - 静電ミラーの反射電位を適当な値にする

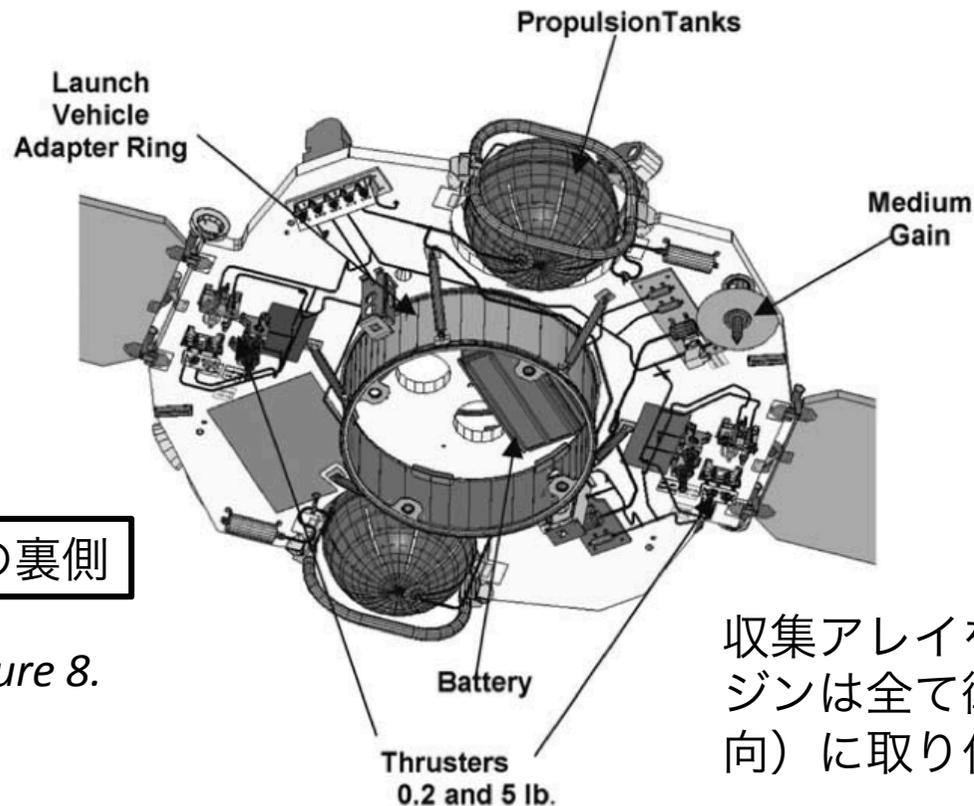
## 6. Instrumentation Overview

- 収納容器と収集器には徹底した清潔が求められる。
  - 収集器は全く同じ物をもう1セット用意し、打ち上げ前のテストにはそちらを使う。テスト後は、収納容器を完全に分解し、クラス10のクリーンルームにおいて実際に使用する骨組みとアレイの枠を洗浄する。そして、新しい収集器を取り付ける。
  - 収納容器への機器の設置が終わった後は、打ち上げの数時間前まで、高純度窒素環境で保管される。
  - 太陽風試料の収集を終え回収された後は、すぐに打ち上げ前の清潔な状態に回復する。

## 7. Spacecraft

### 衛星の概要

- 太陽指向スピン安定姿勢制御
- 機材を取り付けるデッキ部分と回収する SRC から構成される。



### 衛星の裏側

Figure 8.

収集アレイを汚さないようにエンジンは全て衛星の裏側（反太陽方向）に取り付ける。

## 7. Spacecraft

### SRC

- 回収する機器と再突入のためのサポートシステムが入っている。
- 宇宙空間で太陽風に収集器を曝せるように、また大気圏への再突入時には収集器を守るようにデザインされている。
- 上部に回収時の減速用のパラシュートが収容されている。
- 下半分は遮熱材で覆われ、その周りに SRC の回収に必要な電子機器部品が付いている。
  - パッチアンテナ
  - VHF 位置表示信号
    - 着地後数時間信号を発する。
    - 不測の事態が起こったときの地上での回収用
  - GPS 受信機
    - 再突入後、パラシュートが開いた後の SRC の位置の把握のため
  - UHF 送受信機
  - SRC バッテリー

## 8. Mission Operations and Recovery

- 2001年8月8日      打ち上げ  
点検
- 2001年8月23日      静電分析器のスイッチを入れ、開始された太陽風 regime 判  
定のための科学アルゴリズムのテスト  
太陽風の種類の判別ができるかテスト  
収集アレイが汚染される危険性を最小限にするため、SRC  
の蓋を開いて衛星から気体を抜く
- 2001年11月19日      L1軌道に投入
- 2001年11月30日      収納容器を開いて太陽風の収集開始  
収集器が太陽風の風上を向いたまま、地球と共に太陽の周りを  
回転するよう衛星の姿勢を制御する。  
衛星の姿勢制御はエンジンを噴くことで行うが、その際  
収集アレイが汚染されないような方向に噴く。
- 2004年4月            収集終了。収納容器とSRCを閉じ、地球への帰路につく。  
日中にカプセルの回収を行えるよう L2 を経由して夜側から  
地球帰還軌道に入る

## 8. Mission Operations and Recovery

### SRC の回収手順

- 探査機の高度を下げる。
  - 探査機の高度下降を安定に行えるよう、SRCの重心の位置や回転率、空気力学的形状を工夫してある。
- SRCを探査機から切り離す。
- SRCを大気圏に突入させる。
  - 切り離された探査機も大気圏に突入し、太平洋上で燃え尽きる。
- パラシュートで減速する。
- ヘリコプターにより空中回収する。
  - 場所はユタ州テスト・トレーニングセンター場上空
  - 着地点は気象状況等により不確定性が大きいので、回収には広大な空き地が適している。

## 9. Sample Allocation and Curation

### ウエハーの保管手順

- 回収された収集アレイと concentrator を収納した収納容器は、輸送コンテナに容れられて、ジョンソン宇宙センター (JSC) のキュレーション施設に運ばれる。
- 輸送コンテナはクラス 10000 のクリーンルームで開ける。
  - 収納容器の外側を溶剤でしっかりと拭く。
- 収納容器をクラス 100 のクリーンルームで開き、内部の様子を記録する。
- クラス 10 のクリーンルームで収集アレイと concentrator からウエハーを取り外し、塵一つ無い高純度窒素環境に保管する。
  - ウエハーの表面をあらゆる物質との接触、帯電から守る。
- ウエハーの表面の状態を目視検査により記録しておく。

## 10. Overview of Plans for Sample Analysis

- 科学的初期成果として、以下の4つの研究を Genesis ミッションの共同研究者が行う。
  1. 窒素同位体
  2. 希ガス同位体
  3. 酸素同位体
  4. 放射性核の搜索
- 上記4つの研究に使用される試料は全体の1%以下。残りの試料は、世界中の惑星物質の研究グループが使うことができる。
  - ただし、分析手順を提出し、ミッションとは独立した機関である Sample Allocation Committee (SAC) の審査に通る必要がある。

2011年現在、いくつかの科学的成果が発表されている。  
[http://genesis.lanl.gov/publications\\_IX.html](http://genesis.lanl.gov/publications_IX.html)