

国際宇宙ステーション船内 における線量計測

岸本 祐二

高エネルギー加速器研究機構
放射線科学センター

背景

被ばく線量の比較

地上 : 2 ~ 3 mSv/year (自然放射線)
宇宙機内 : 0.1 ~ 1 mSv/day (フレア時は急増)

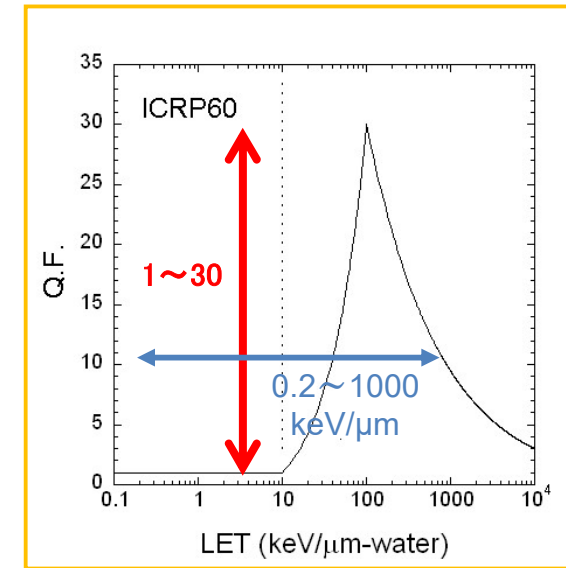
※In SPE (Solar Particle Emission) : >100 mSv/day

宇宙環境で被ばく要因となる線質と寄与

宇宙機内 : 荷電粒子 (80%), 中性子 (20%)*¹

月面(計算値) : 荷電粒子 (93%), 中性子 (7%)*²

*1: Measured (STS-89), *2: Calculated (Spa. Rad 2006)



線質係数

線量計測におけるエラーが **30% (1σ)** 以内であることが望ましい

National Council of Radiological Protection Report No. 142(NCRP-142)

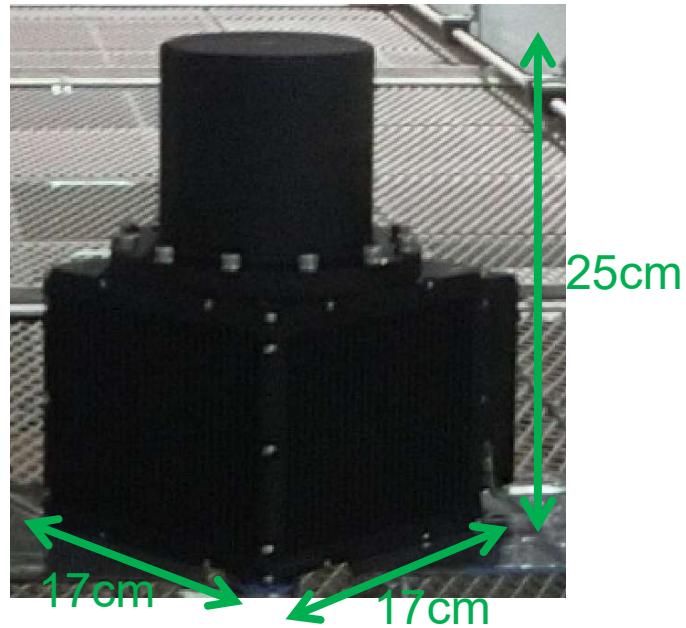
線量当量 = 線質係数Q(LET) x 吸収線量

LET(Linear Energy Transfer, 線エネルギー付与)

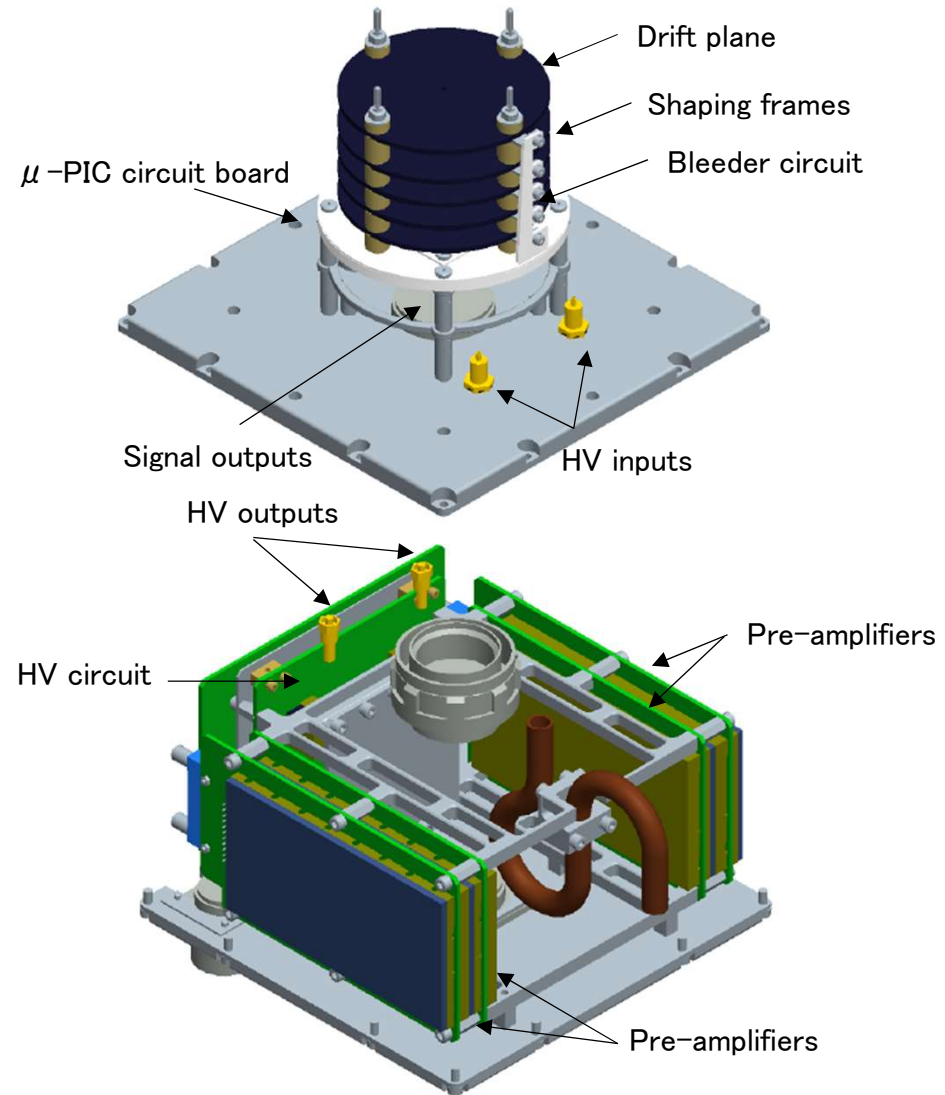
= Energy deposition / Path length

吸収線量だけでなく、**LET**も同時に測定できる線量計

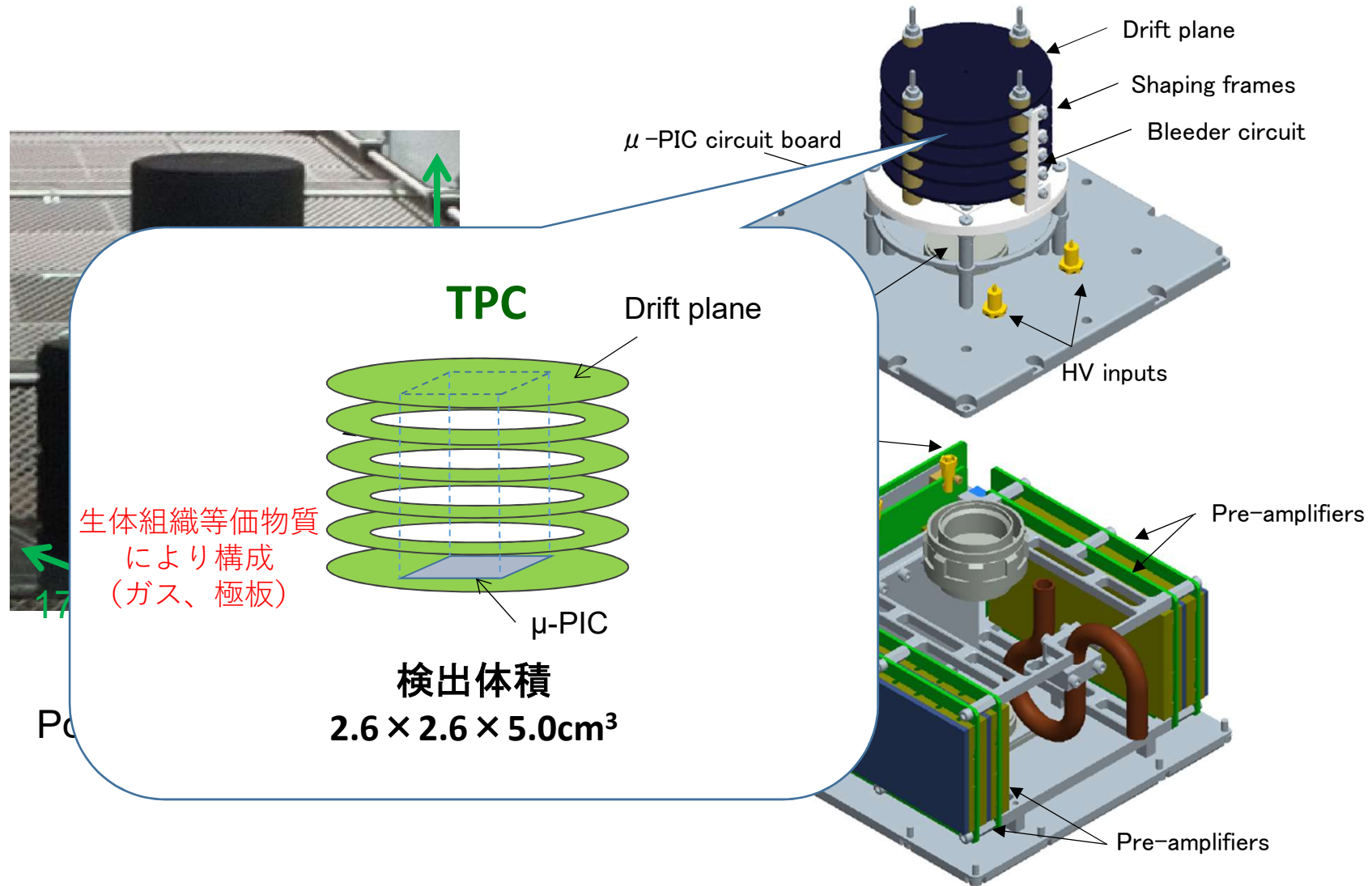
生体組織等価比例計数箱 (PS-TEPC)



Power consumption : 8.99W



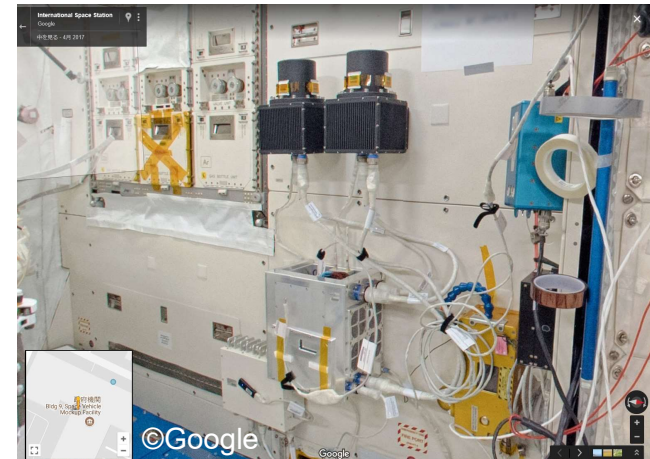
生体組織等価比例計数箱 (PS-TEPC)



国際宇宙ステーションでの動作実証試験

日時	イベント
2016.12.9	打ち上げ
2016.12.14	きぼうモジュールへ設置
2016.12.14～12.28	立ち上げ、初期チェック、パラメータ設定
2016.12.28～	定常運用開始

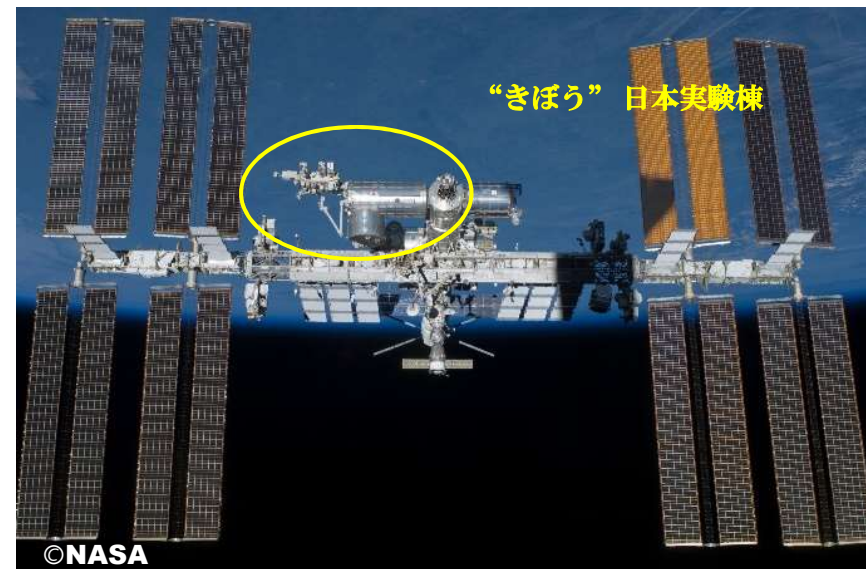
- 2台のディテクターユニット(DU)
- 線壁へ取り付け
- 受動型線量計PADLESの貼り付け
- TSFCでの運用・KEKへのリアルタイムデータ転送



設置されたPS-TEPC



H-IIIBロケットによる打ち上げ
HTV(こうのとり)6号機に積載



国際宇宙ステーション

放射線に対する設計方針

- 地球低軌道（高度450 km）
- 短いミッション期間（3ヶ月）
- 遮蔽厚

PS-TEPCの最少シールド厚(Al) : 1.6[mm]
 JEMの与圧隔壁のAl等価厚 : 11.3[mm]

計 : 12.9[mm]

⇒ トータルドーズ **42.2 [rad/年]** 以下

地球低軌道（高度500km）におけるトータルドーズ

SHIELDING (MILS)	SHIELDING (MM)	SHIELDING (G/CM ²)	ELECTRONS	PROTONS	TOTAL DOSE
2.500E+02	6.350E+00	1.765E+00	2.520E+01	5.214E+01	7.734E+01
3.000E+02	7.620E+00	2.118E+00	7.909E+00	4.925E+01	5.716E+01
3.500E+02	8.890E+00	2.471E+00	3.407E+00	4.587E+01	4.928E+01
4.000E+02	1.016E+01	2.824E+00	1.877E+00	4.439E+01	4.626E+01
4.500E+02	1.143E+01	3.177E+00	1.507E+00	4.278E+01	4.429E+01
5.000E+02	1.270E+01	3.531E+00	1.363E+00	4.088E+01	4.224E+01
6.000E+02	1.524E+01	4.237E+00	1.197E+00	3.820E+01	3.940E+01
7.000E+02	1.778E+01	4.943E+00	1.079E+00	3.619E+01	3.727E+01
1.000E+03	2.540E+01	7.061E+00	8.360E-01	2.995E+01	3.079E+01
1.500E+03	3.810E+01	1.059E+01	6.098E-01	2.333E+01	2.394E+01
2.000E+03	5.080E+01	1.412E+01	4.779E-01	1.892E+01	1.940E+01
3.000E+03	7.620E+01	2.118E+01	3.085E-01	1.264E+01	1.295E+01
4.000E+03	1.016E+02	2.824E+01	1.927E-01	9.266E+00	9.459E+00
5.000E+03	1.270E+02	3.531E+01	1.143E-01	7.131E+00	7.245E+00

NASA/ESA INTERNATIONAL SPACE STATION ALPHA PROGRAM SPACE STATION IONIZING RADIATION DESIGN ENVIRONMENT JUNE 3, 1994 から引用

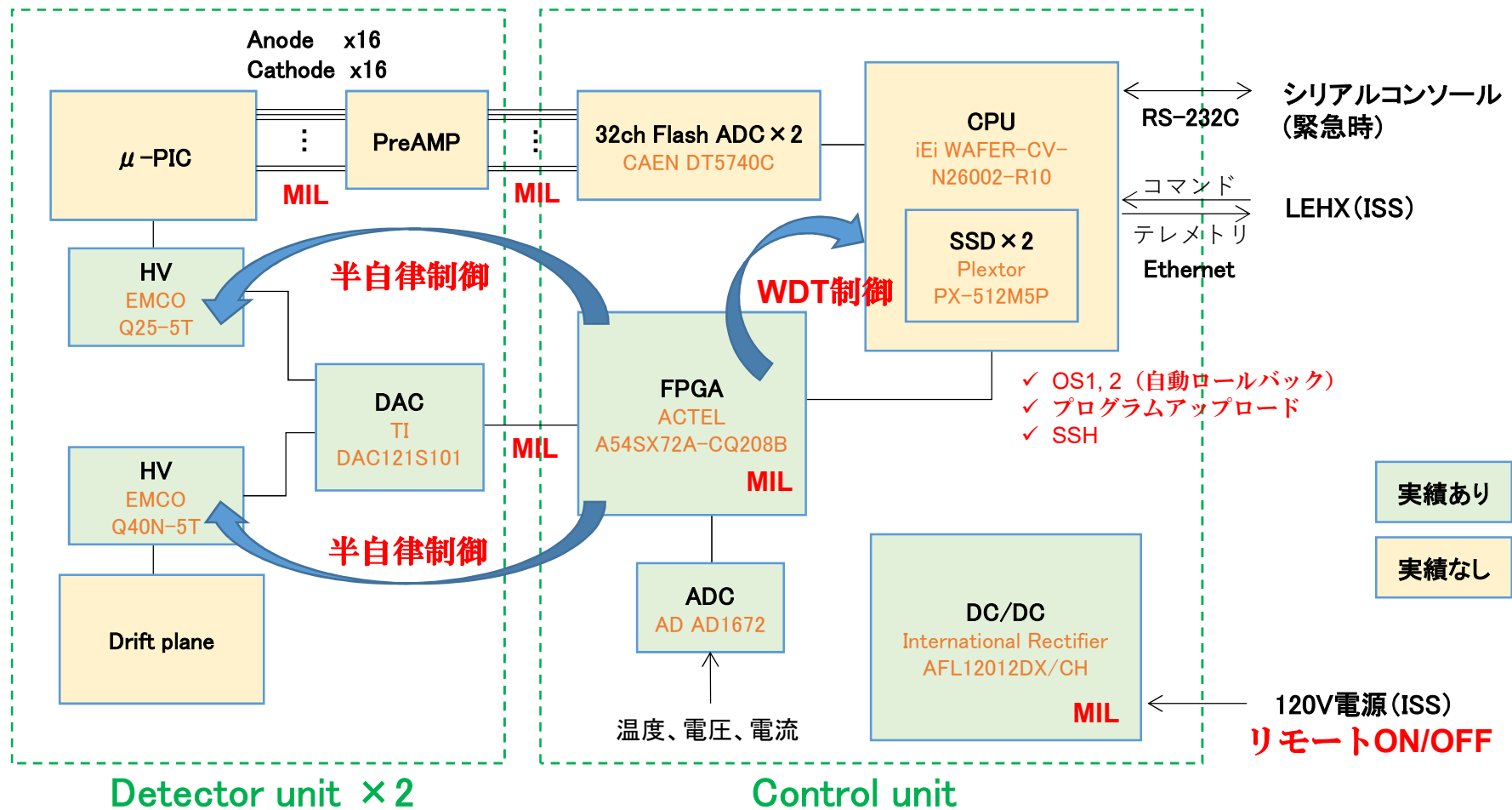
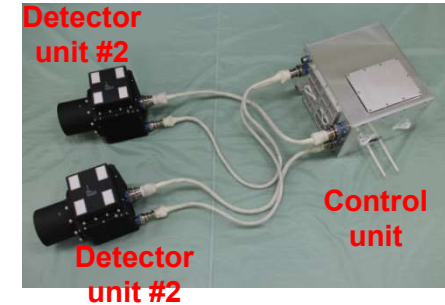
- 高度450 km、3ヶ月 ⇒ Total doseは 10 rad程度
- ネットワーク環境、有人環境⇒シングルイベントによる不具合はリセットにより対応



民生品をベースに構築

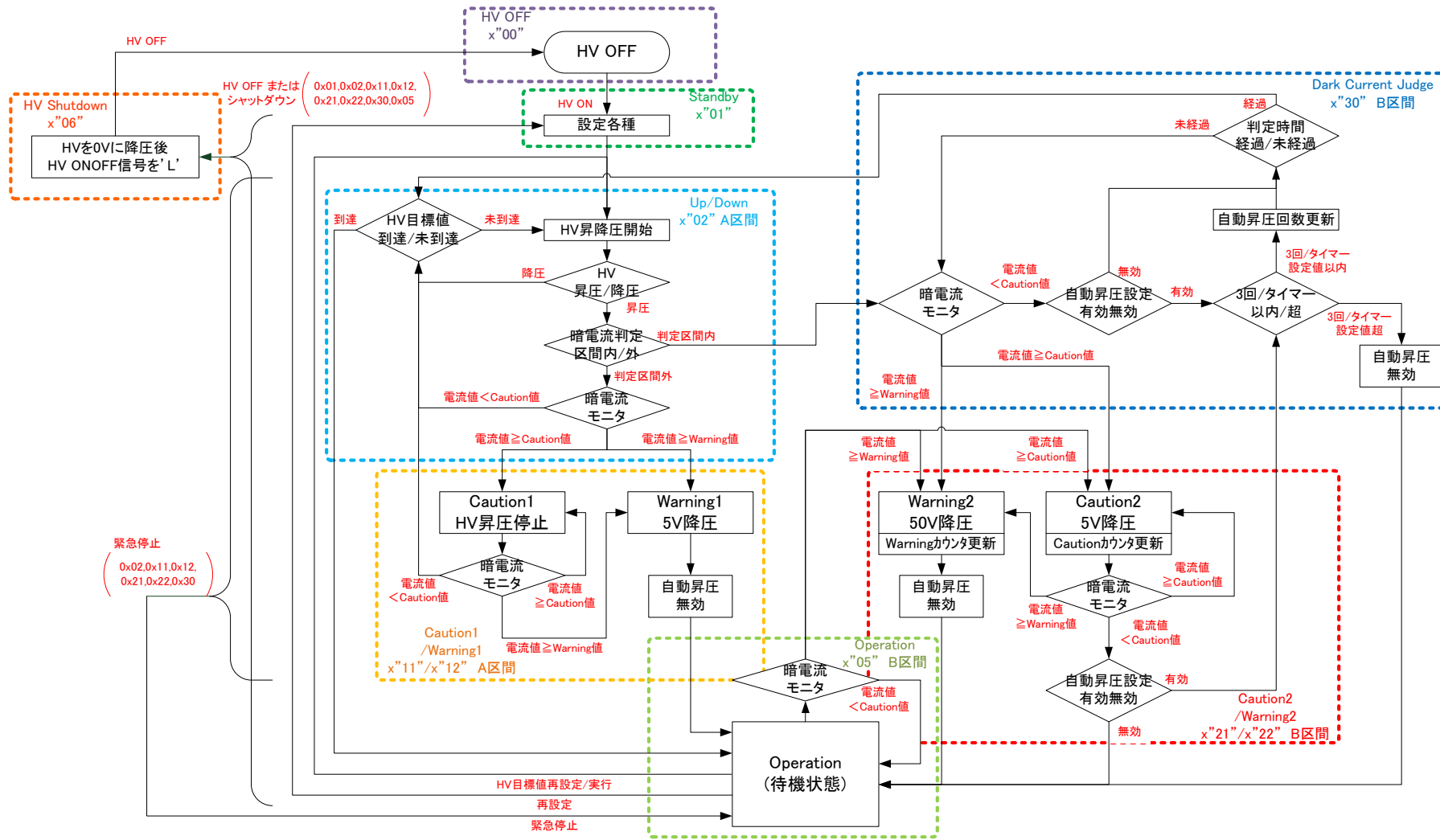
システム概要

- 打ち上げ実績のある部品を使用
- 重要部品はMIL規格品
- ソフト面できることはやる

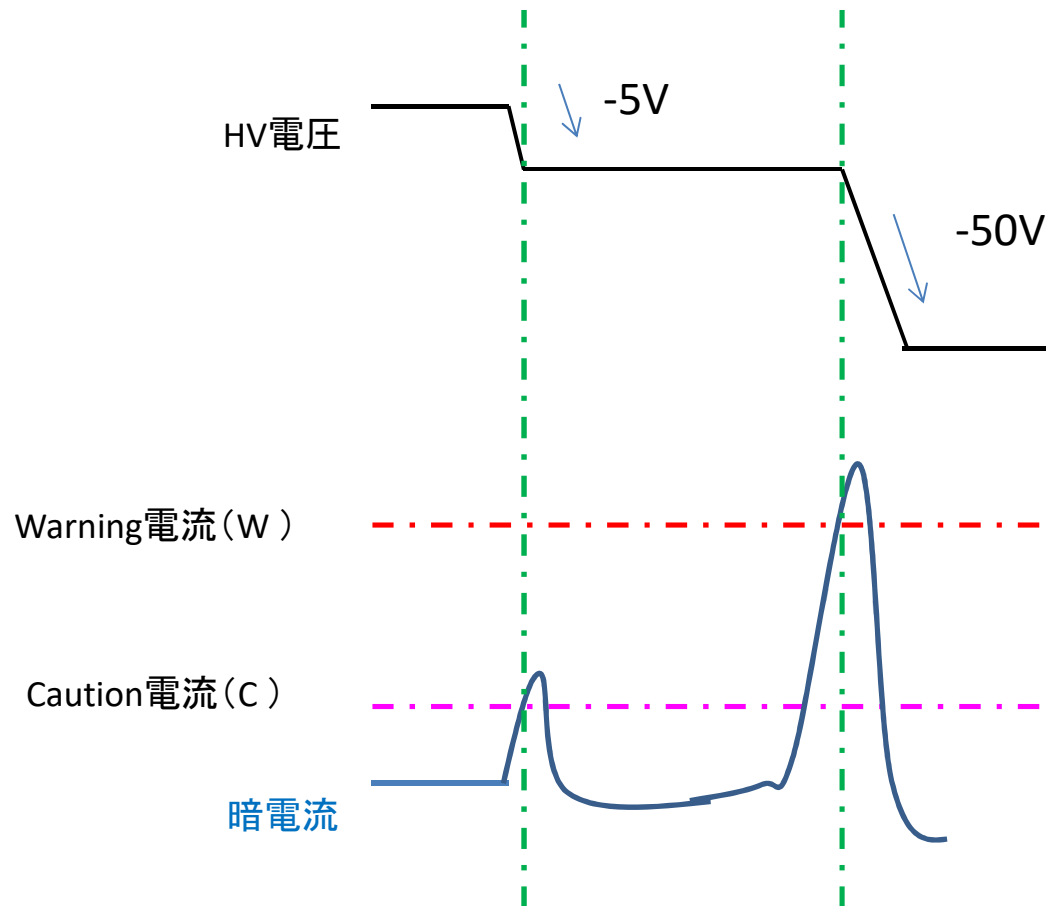


<HV自動制御>

定常時の暗電流モニタおよびHV昇降圧時の制御を反映したFPGAの処理を以下に示す。



HV制御（暗電流モニタリング）



※ 暗電流モニタ値がCaution電流を上回ったらHV電圧を5V下げる。

Warning電流まで上回ったらHV電圧を50V下げる。

Warning電流(W) = 100nA(初期値)

Caution電流(C) = 50nA(初期値)

SSDの動作不良

2016年12月28日～2017年3月28日

- ・ 定常運用

2017年3月29日

- ・ 後期運用開始

2017年4月30日

- ・ テレメ途絶
- ・ パワーサイクル実施もテレメ復旧せず

5月～11月

- ・ コンソールでの原因調査
 - － CPUボードのSSDに異常が疑われる
 - － BIOSは立ち上がる
 - － BIOSではSSDを認識
 - － ブートローダー (Grub1段目) 起動時にエラー
 - － OSロールバック不可

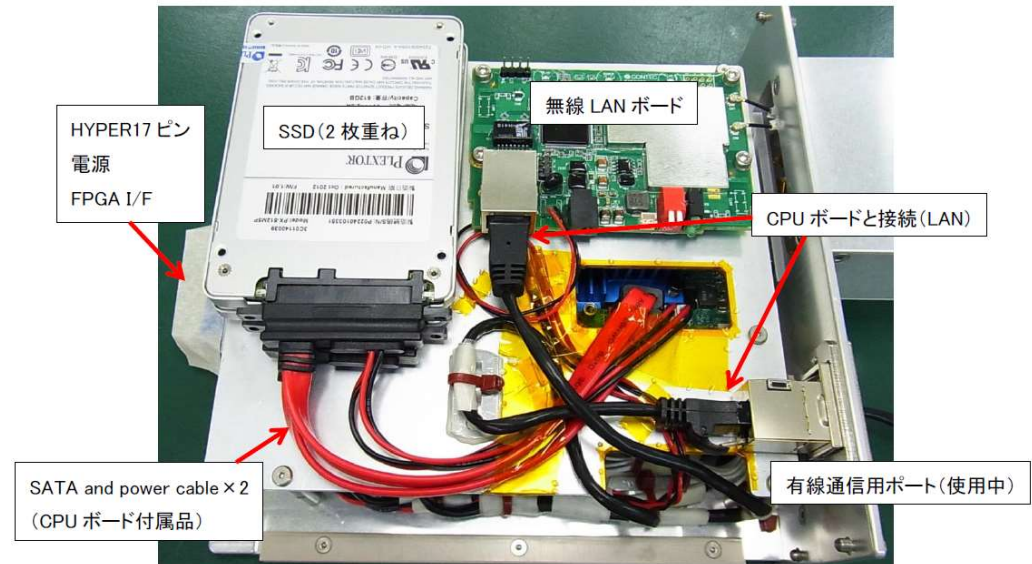
- ・ リモートでの復旧作業→うまくいかず

11月29日

- ・ SSD交換により復旧
- ・ 全システムの動作確認
- ・ 測定再開

2018年4月2日

- ・ 運用終了



動作不良を起こしたSSDは地上に戻してストレージ故障調査の専門会社に調査を依頼。しかし、地上では**そのままOSが起動**。その後の調査も異常なし。コネクタの接触不良？ (ケーブルストレス、メッキが薄い)

まとめ

- LETを計測可能かつ生体組織等価である**宇宙放射線環境用線量計**として**PS-TEPC**の開発を行っている。
- 国際宇宙ステーションきぼうモジュールに搭載し、2016年から1.4年程度の軌道上での動作・性能実証試験を行っている。軌道上で動作し、宇宙放射線の線量導出に必要な**0.2~1000 keV/μm**のLETが計測出来ること、線量当量が**15%程度の精度**で導出できることを実証した。
- 高度450km、ミッション期間3ヶ月の想定からISS搭載モデルは**民生品**を使用して構築した。SSDの不具合が起こったが原因は不明。他に致命的な動作不良はなかった。