

高温超電導 SQUID による地下観測と脱炭素社会

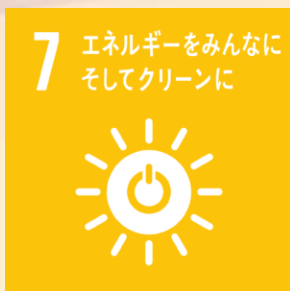


超電導センシング技術研究組合



超電導センサテクノロジー株式会社

波頭経裕



目次

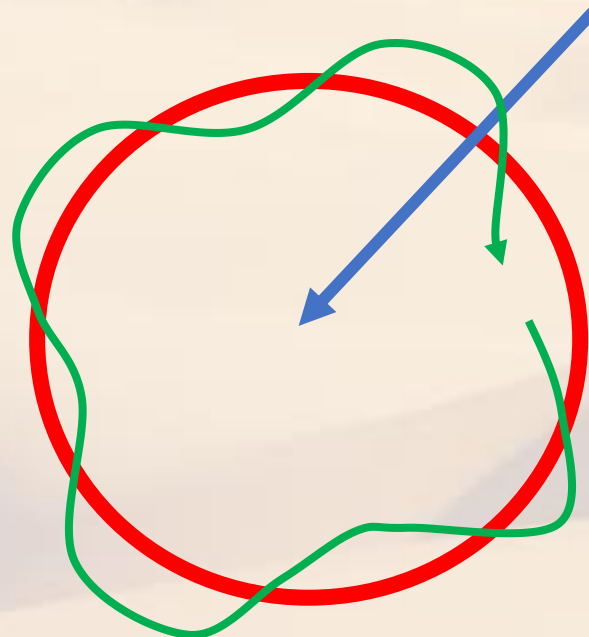
- 1 SQUIDの基礎知識
 - (1) 原理
 - (2) 磁力計としてのシステム構成
 - (3) ノイズ
 - (4) 感度と周波数帯域
- 2 脱炭素社会の実現に必要な地下観測のニーズとSQUID
- 3 脱炭素社会に向けた応用
 - (1) 地熱資源探査・モニタリングへの応用
 - (2) 二酸化炭素地下貯留 (CCUS) と油層の有効活用
- 4 今後の展開

1 SQUIDの基礎知識

(1) 原理

超電導リング

磁束 ϕ



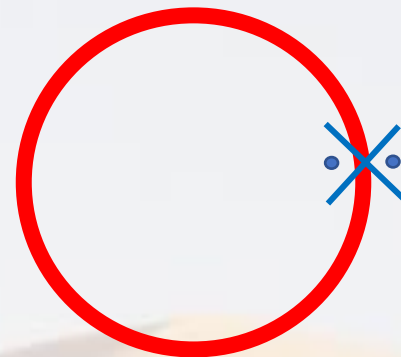
どう読み出すか



ジョセフソン
接合をつける

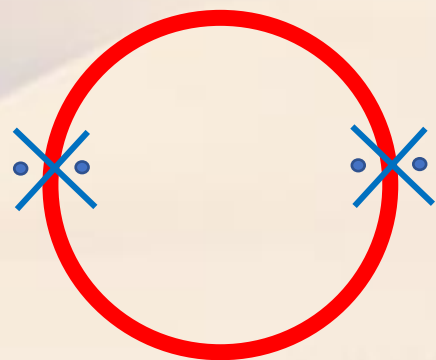
位相

RF-SQUID



Φ_0 周期で共振周波数が変わる
共振回路で読み出す
構造が簡単 感度は劣る

DC-SQUID

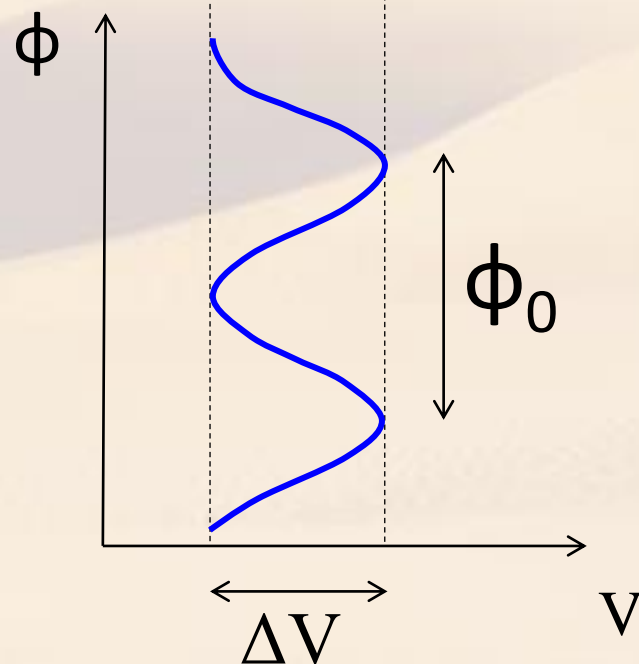
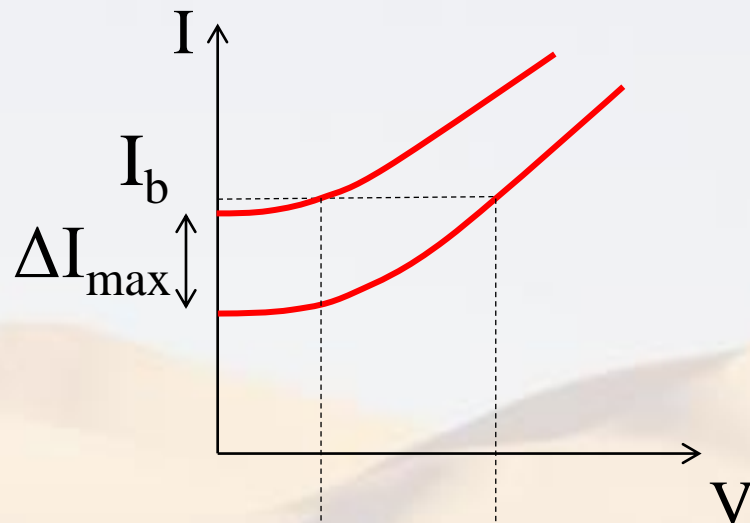
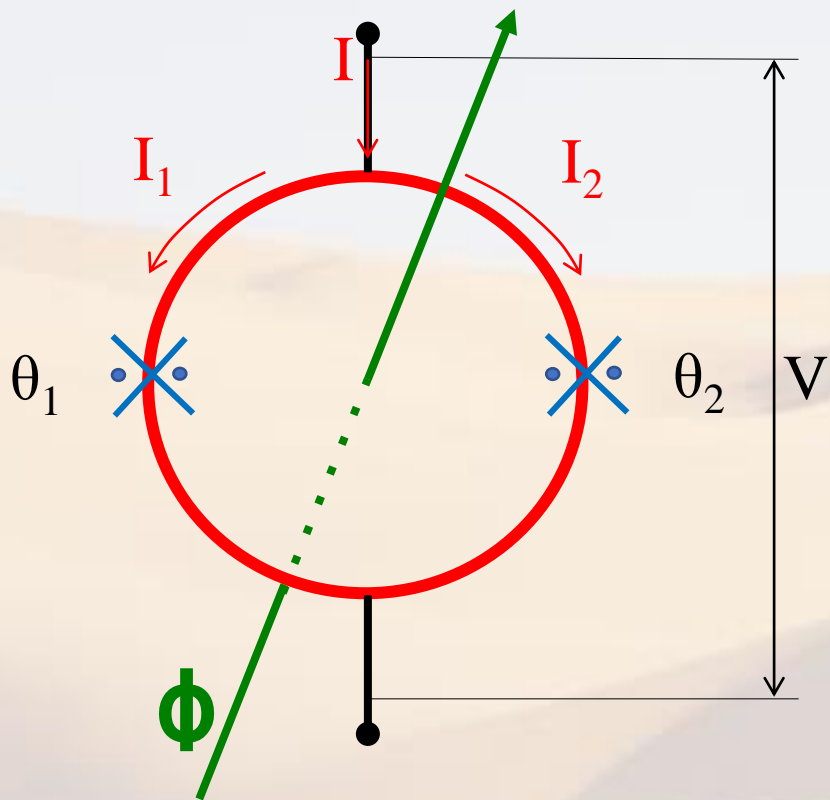


Φ_0 周期で電圧が変わる
通常FLL回路による
電圧読み出しを行う

位相は連続でなければならない $\rightarrow 2\pi n$

量子化された磁束 Φ_0 (2.07×10^{-15} Wb) 単位でしかリングには入れない

磁場と電圧の変化



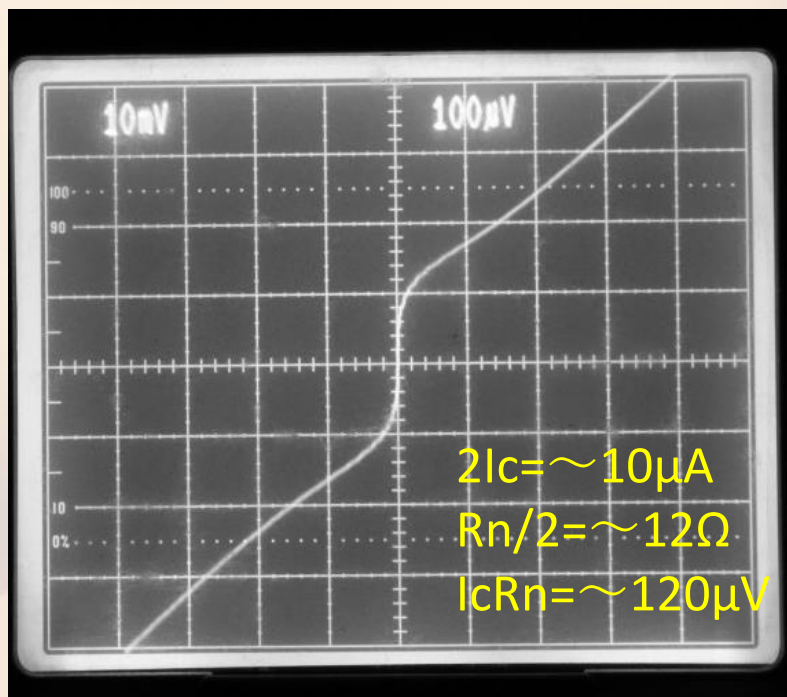
$$I = I_1 + I_2 = I_c (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$$

$$\phi - \phi_0 (\theta_1 - \theta_2) / 2\pi = n\phi_0$$

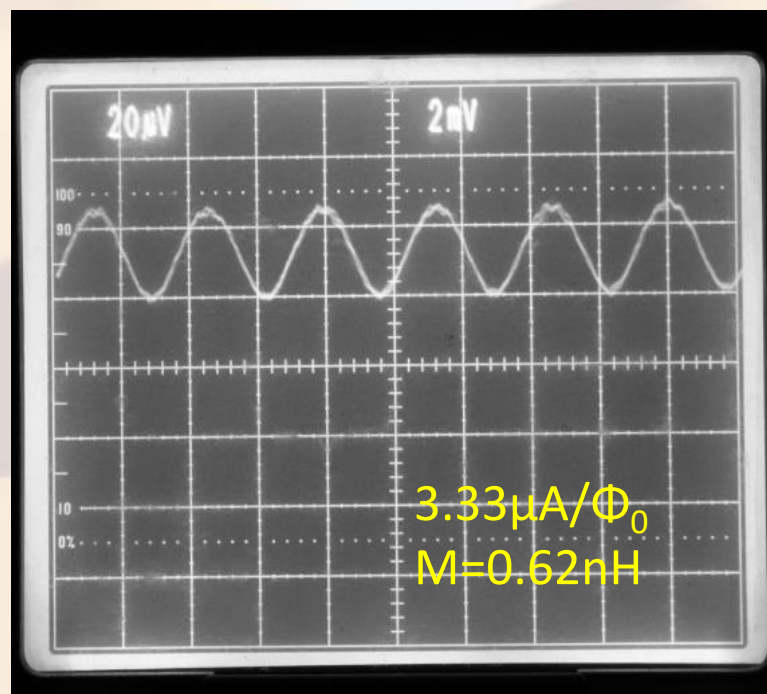
$$\longrightarrow I_{\max} = 2I_c |\cos \pi\phi / \phi_0|$$

HTS-SQUIDの77kでの特性例

縦軸：10 μ A/div、横軸：100 μ V/div 縦軸：20 μ V/div、横軸：2 μ A/div

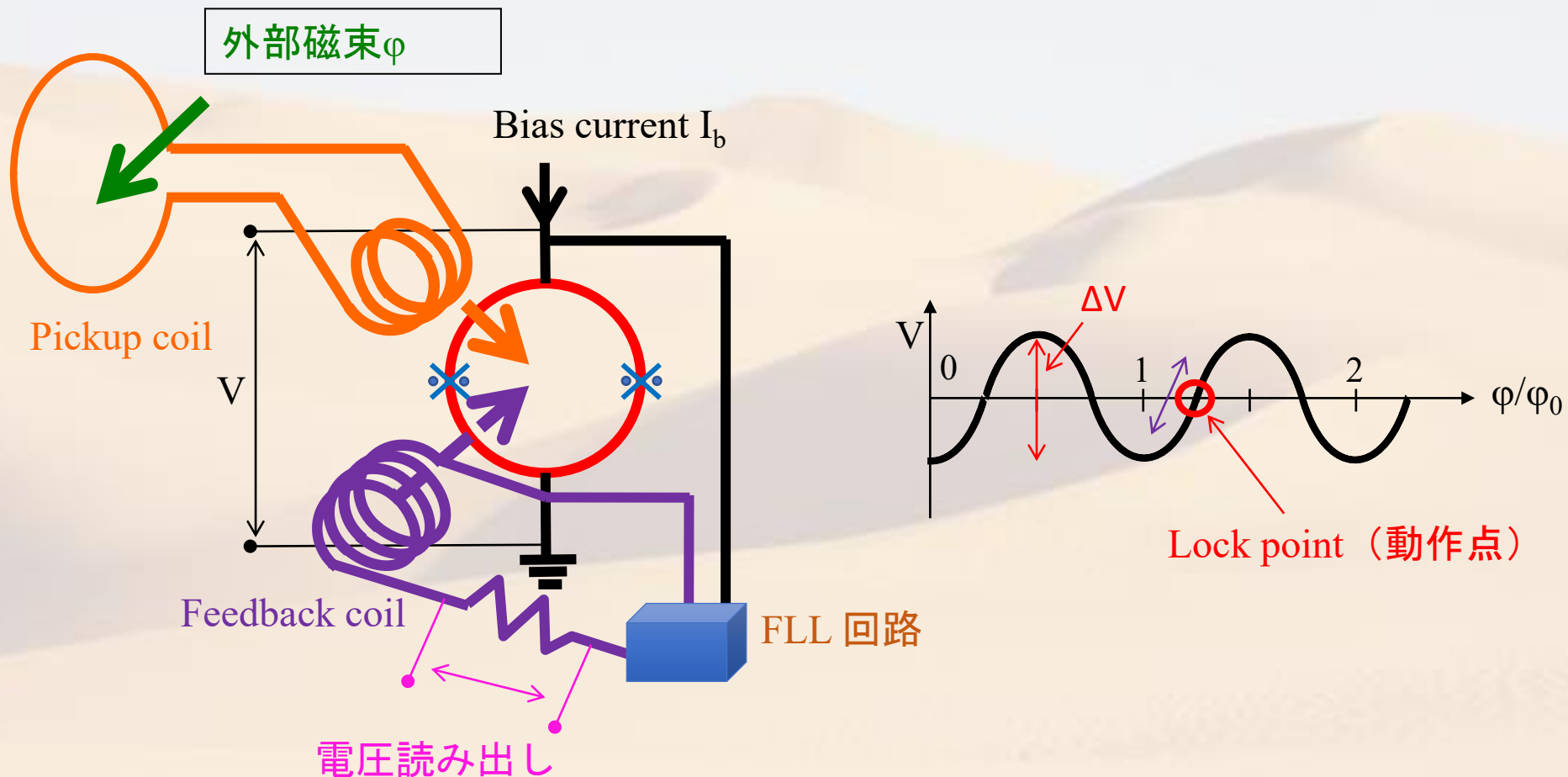


(a) 電流-電圧特性



(b) 電圧-磁束特性

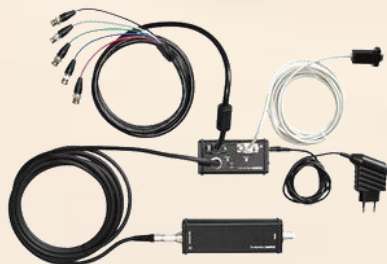
(2) 磁力計としてのシステム構成



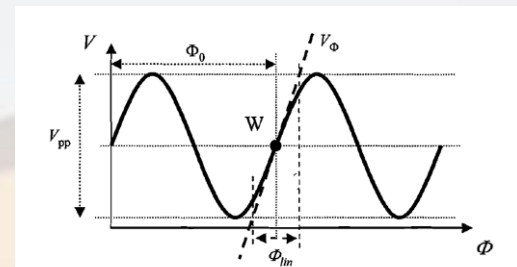
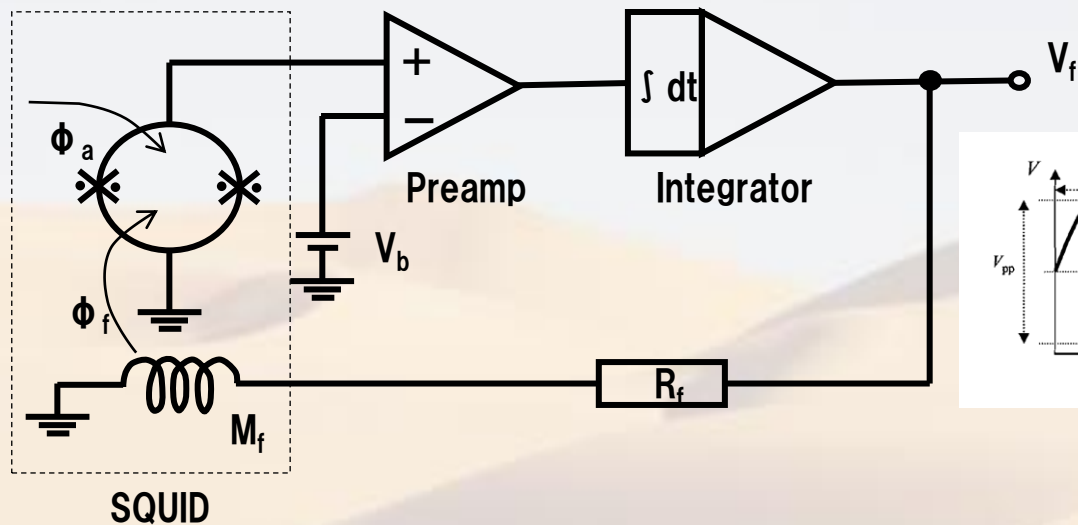
FLL回路

非変調型

回路がシンプル
スルーレート優先
ドリフトが生じやすい



Magnicon 6MHz-20MHz

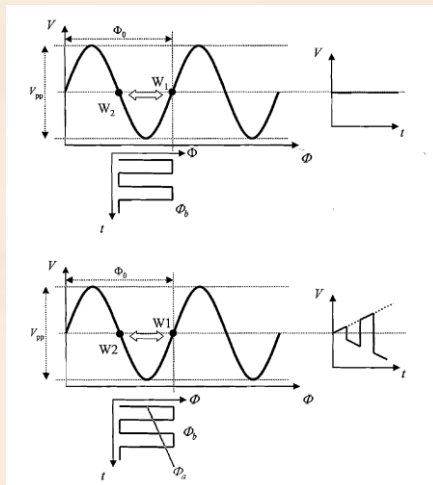
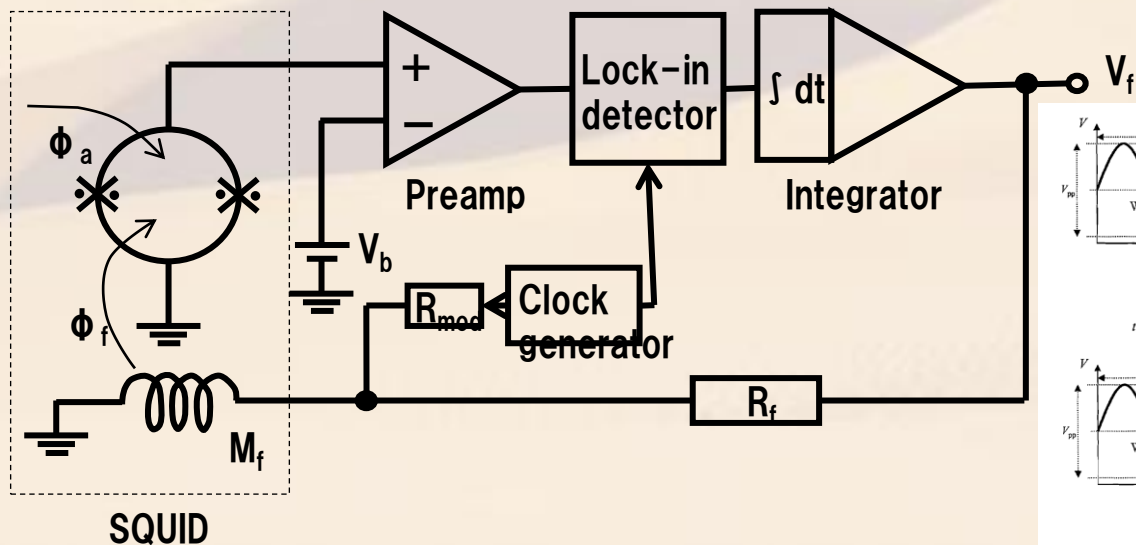


変調型

回路が複雑／大型
ドリフトに強く
長時間計測に有利



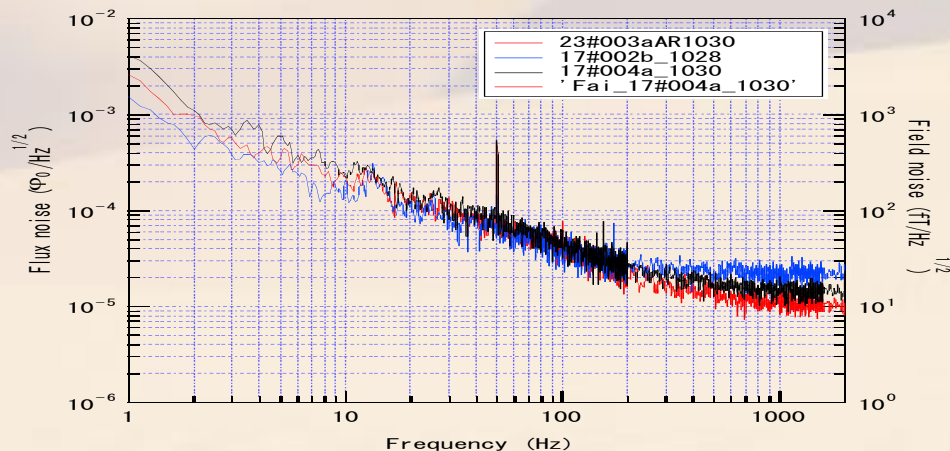
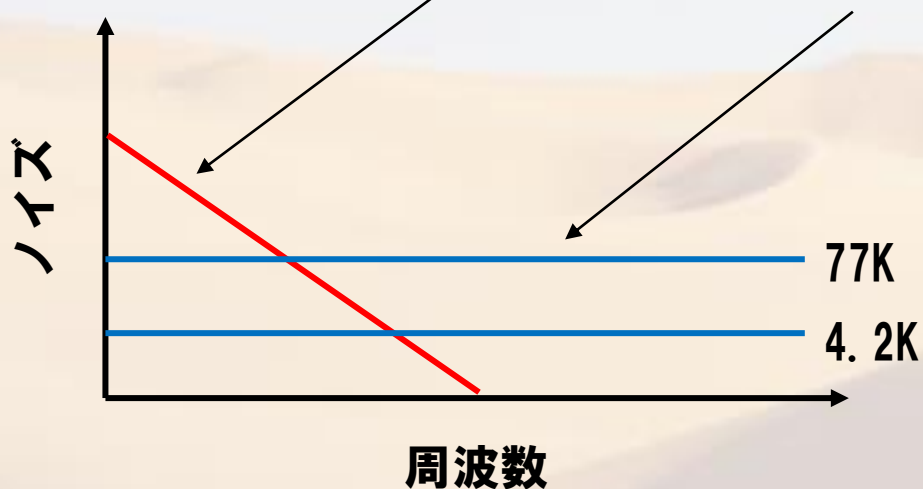
STAR CRYOELECTRONICS



(3) ノイズ

1/fノイズ

ホワイトノイズ

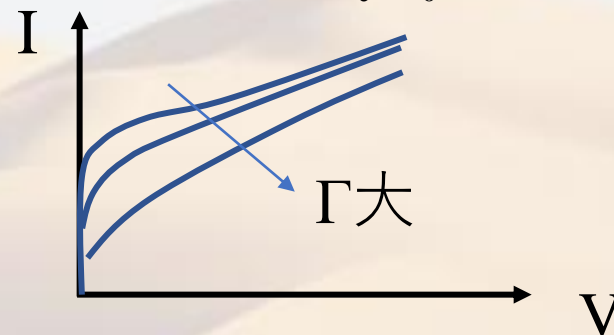


ホワイトノイズ領域で10-25 fT/Hz^{1/2}

- (1) トラップされた磁束の移動
- (2) ジョセフソン接合内のI_cの変動

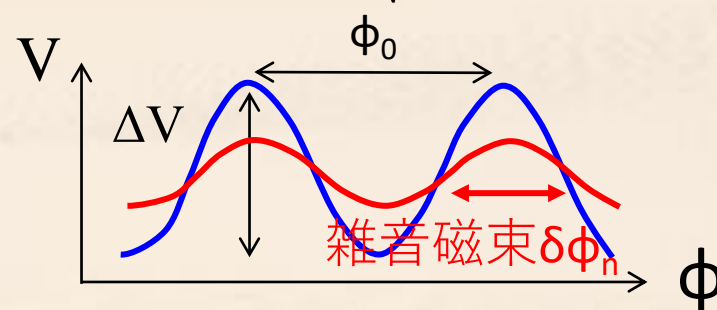
(1) I-V特性のラウンディング

$$G = \frac{2\rho k_B T}{(2I_c) f_0}$$

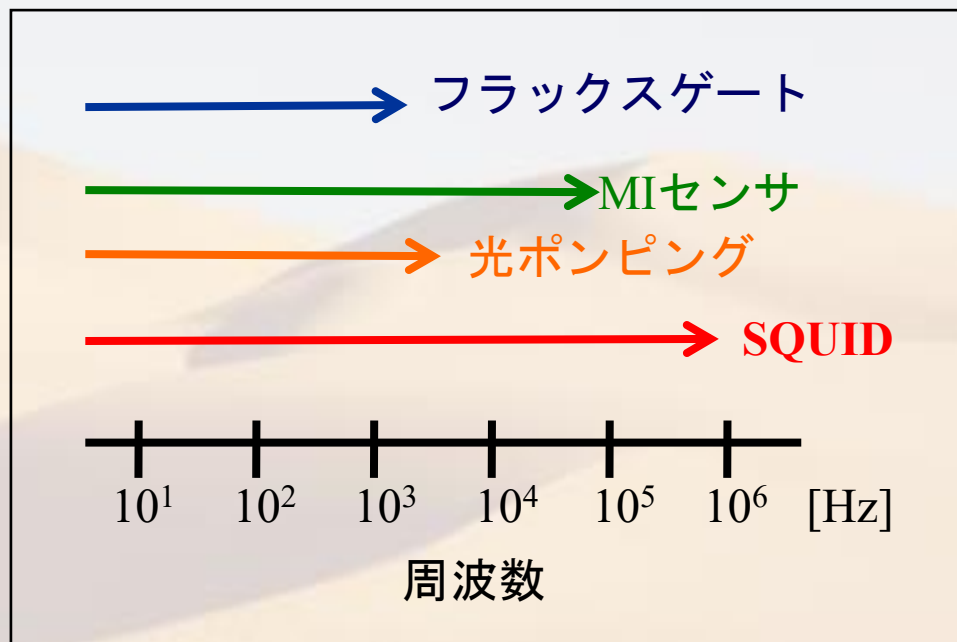
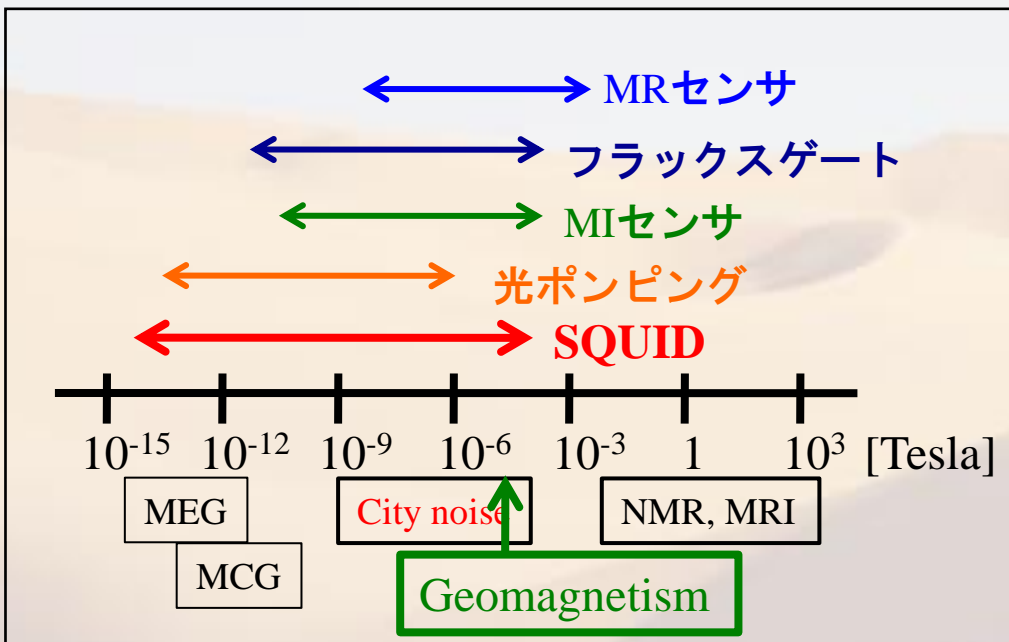


(2) インダクタンス内の熱雑音 (雑音磁束)

$$df_n = \sqrt{k_B T L_s}$$



(4) SQUID感度と周波数帯域



高感度
ワイドダイナミックレンジ
広い周波数帯域
ベクトルセンサ

資源探査向き



課題

耐磁場性能
スルーレート
冷却の容易さ

SQUIDの応用事例

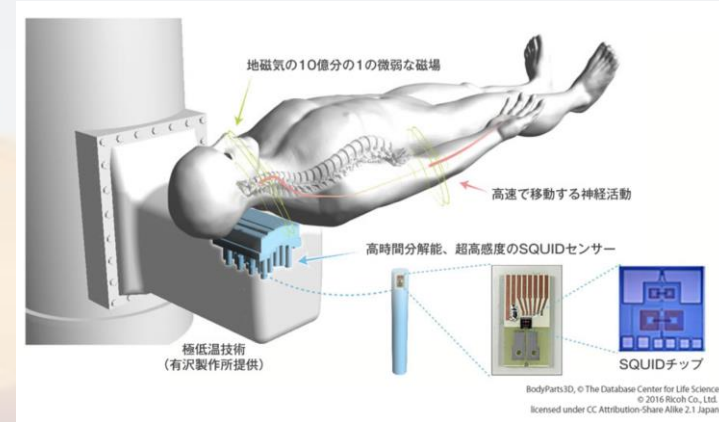
脳磁計 ELEKTA社



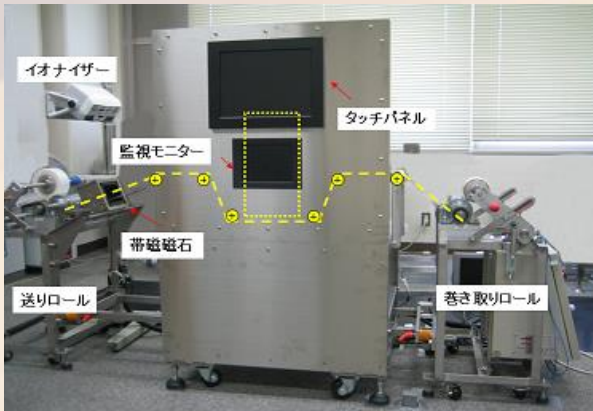
心磁計 日立



脊磁計 リコー



リチウムイオンバッテリーの
異物検査 豊橋技科大



地震観測装置 (地磁気)



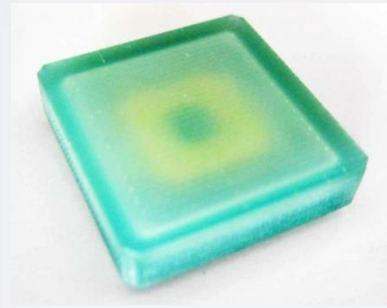
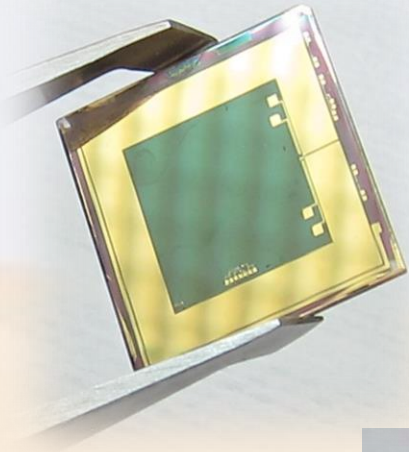
非破壊検査

免疫診断
疾病診断
分析・計測

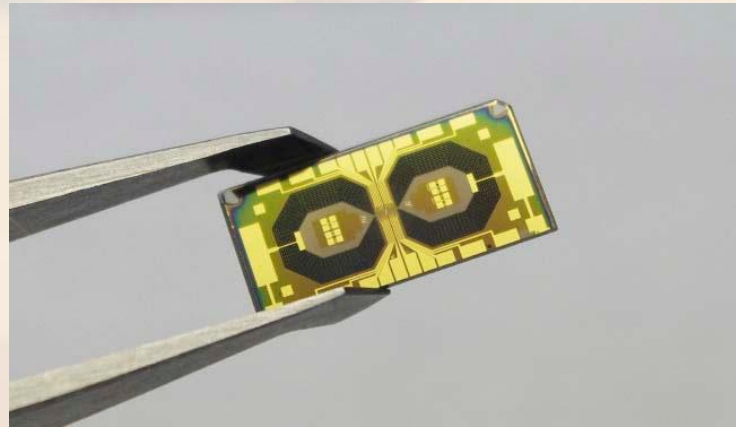
インフラ
航空機
水素ボンベ
バッテリー

SQUID顕微鏡

- ・
- ・
- ・

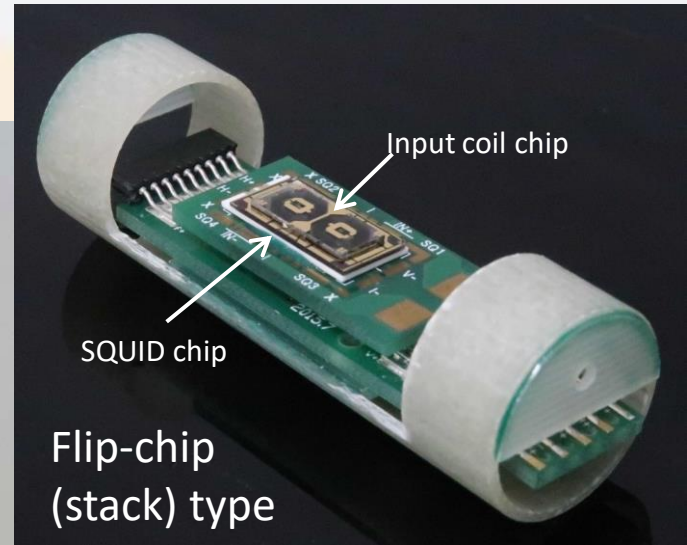


マグネトメータモジュール



高バランスグラジオメータ

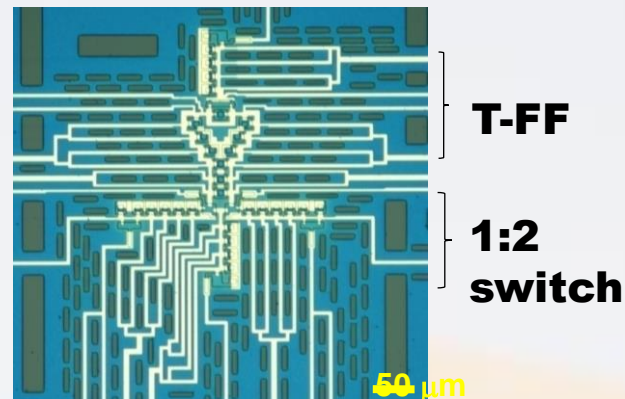
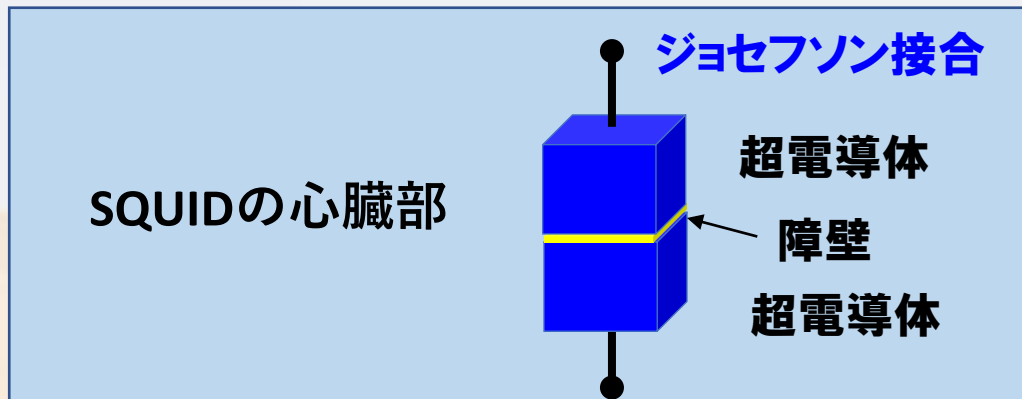
- + Baseline = 5 mm
- + Imbalance < 10^{-4}



外付けピックアップループ用
グラジオメータモジュール

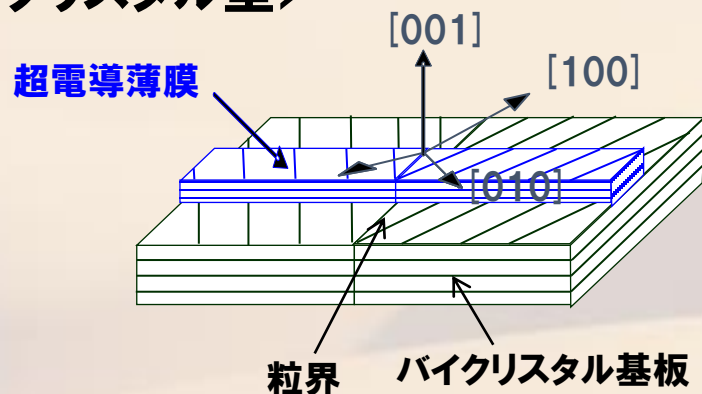
- + enable flexible system design
- + mostly used for NDT systems
- magnetic immunoassay system

世界のHTS-SQUIDと何が違うのか

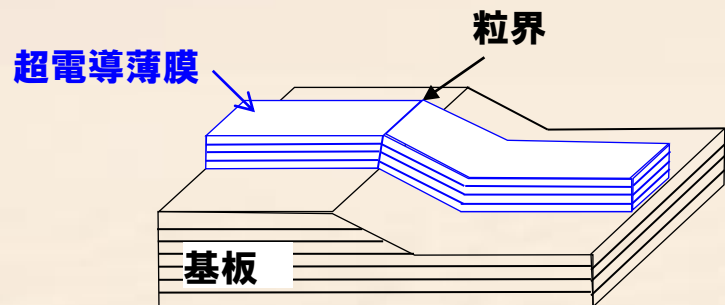


集積回路用多層化技術の転用

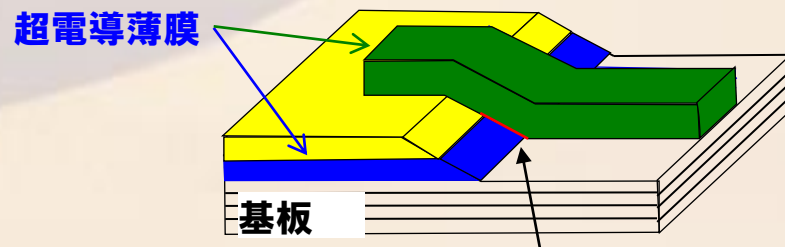
<バイクリスタル型>



<ステップエッジ型>



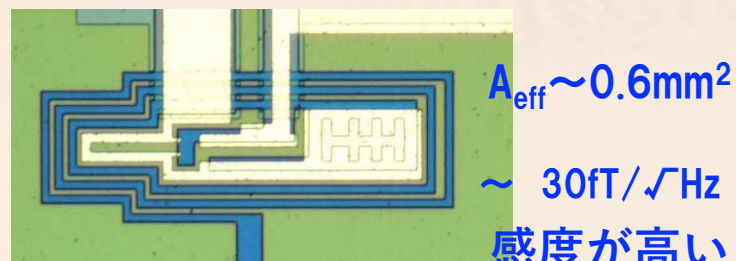
<ランプエッジ型>



耐磁場性能
最大15000倍

地磁気の170倍
でトラップしない

接合は超電導膜で覆われている



2. 脱炭素社会の実現に必要な地下観測の ニーズとSQUID

社会のトレンドは脱炭素社会

従来の電磁探査

SQUID
技術

大深度高精度電磁探査

日本独自技術によるブレークスルー
ゲームチェンジャー

地層構造を可視化できる技術

⇒

貯留槽内部を可視化できる技術

新規油田開発

既存油田の再利用

CCUS事業 (CO₂)

地熱開発 (代替自然エネルギー)

(従来技術)

弾性波探査

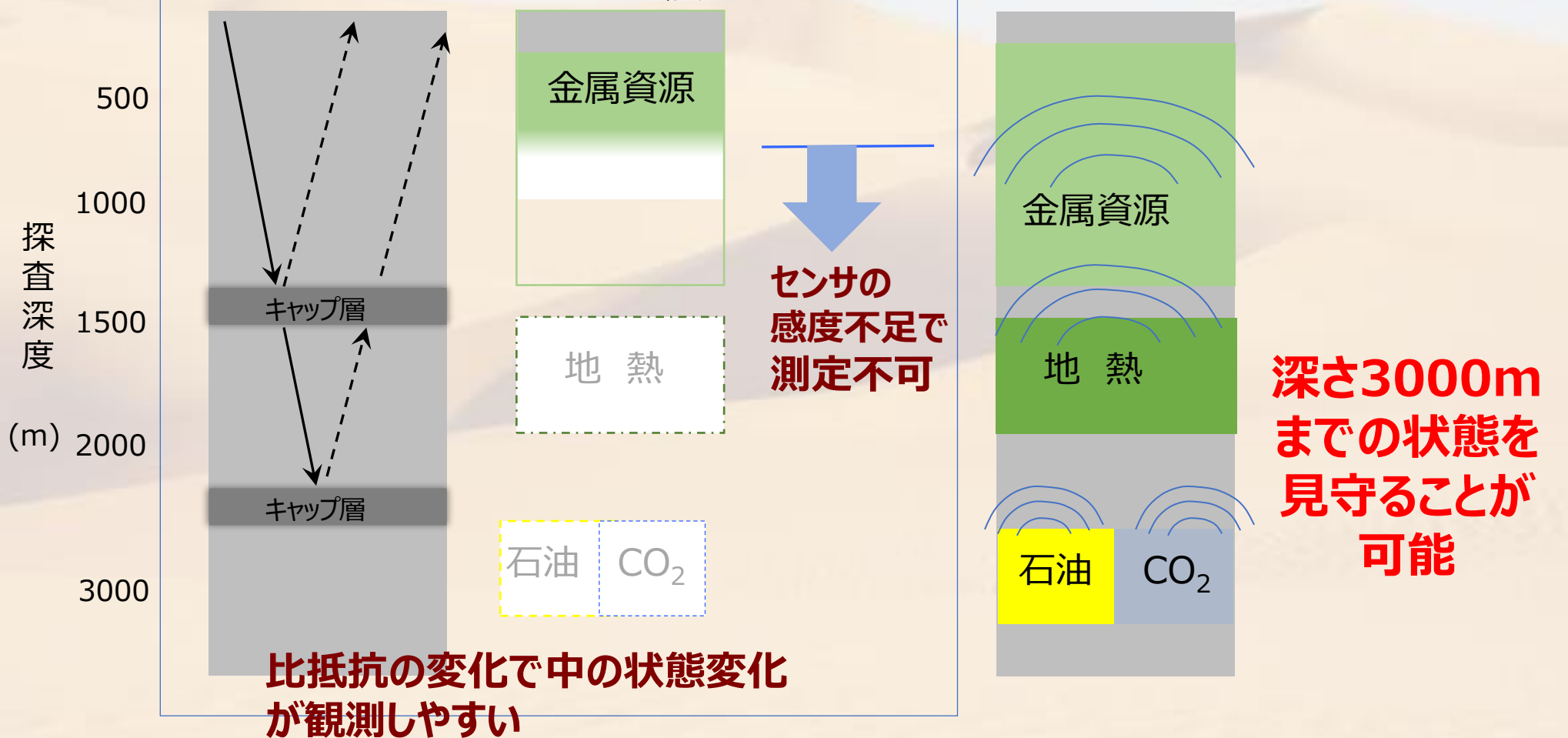
(振動の跳ね返りで調べる)
硬い地層の場所特定

電磁探査

地層の**比抵抗**を測定

TEM法

SQUIDをTEM法に使うと



世界のHTS-SQUID-TEMシステム

	CSIRO	Julich	Supracon	Tristan	SUSTERA
SQUID Type	dc	rf	dc	dc	dc
Noise in field @25Hz (fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	45	1000	20-50	50	40
Bandwidth (KHz)	1000	20	2000	50	100
Dynamic range (dB)	110	130	145	160	146
Slew rate (mT/s)	2.66	2	2-3	1.1	10.5
Weight (Kg)	6	12	5+7	12.2	2.5+0.8
Power (W/channel)	2	3	3	50	0.96

3 脱炭素社会に向けた応用

(1) 地熱資源探査・モニタリングへの応用

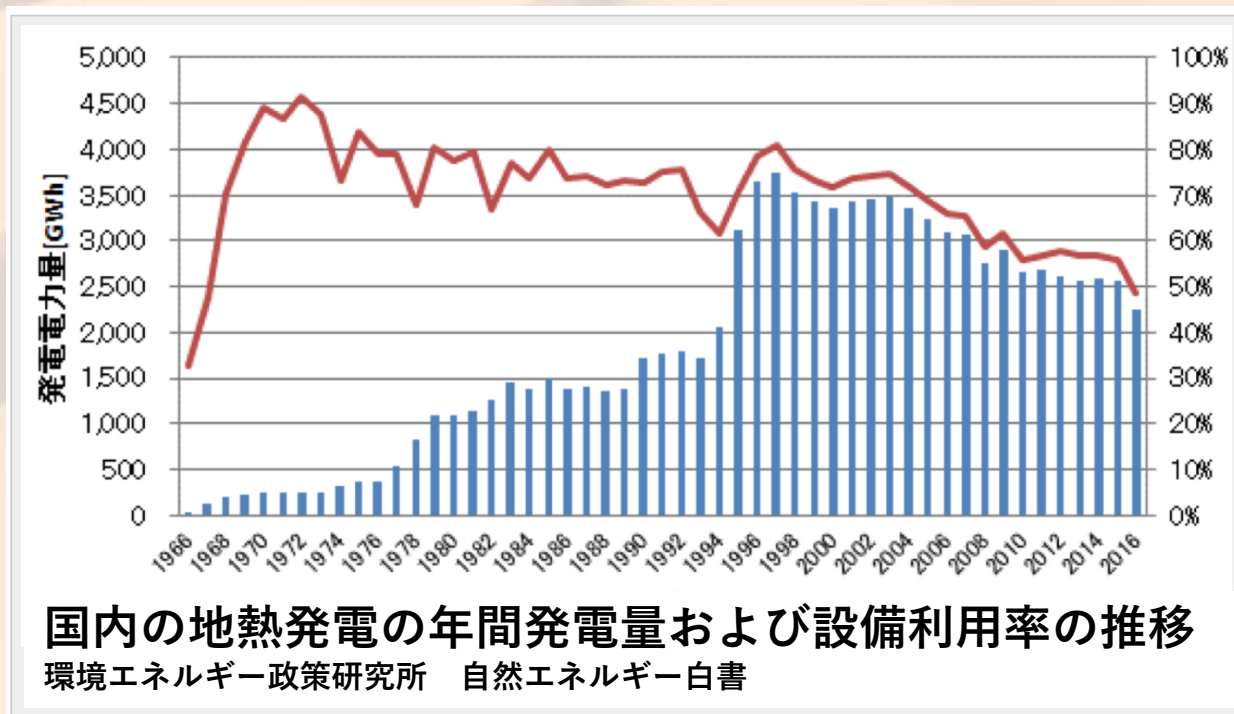
地熱貯留層

- 1 水:降水の地下への浸透
- 2 熱:マグマ
- 3 容器:不透水層が蓋の役割

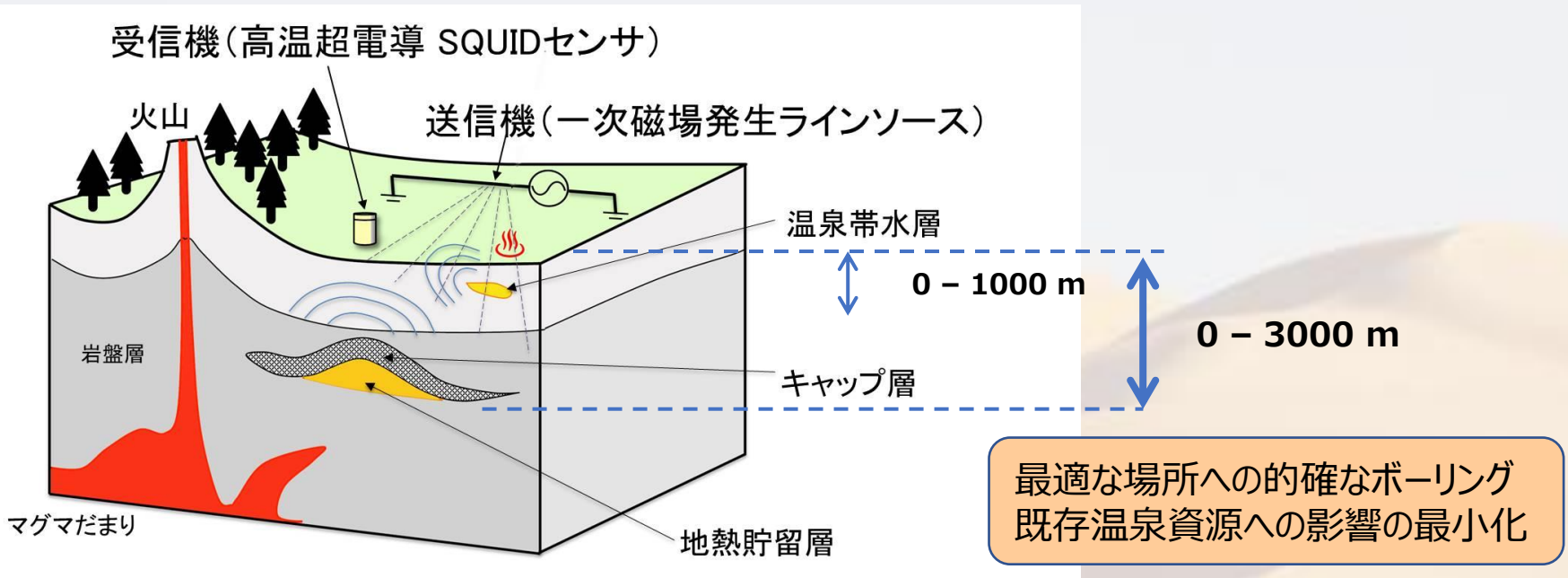
【主要国における地熱資源量及び地熱発電設備容量】

国名	地熱資源量 (万kW)	地熱発電設備容 量(万kW)
アメリカ合衆国	3,000	345
インドネシア	2,779	134
日本	2,347	53 (2016年度時点)
ケニア	700	59
フィリピン	600	187
メキシコ	600	102
アイスランド	580	67
エチオピア	500	1
ニュージーランド	365	101
イタリア	327	92
ペルー	300	0

※平成29年度資源エネルギー庁資料より



探査のみならず地下の経過観測(モニタリング)が重要



従来技術		
弾性波	重力	MT法
波の反射 硬い地層 (キャップ層)	岩石密度 地層構造	電磁応答 熱水層 (⇔比抵抗) 1000~10000 m 広域調査に最適

SUSTERAの技術
TEM法 (SQUID利用)
電磁応答 熱水層 (⇔比抵抗) 深さ0~3000 m、高分解能 掘削計画検討・掘削後経過観察

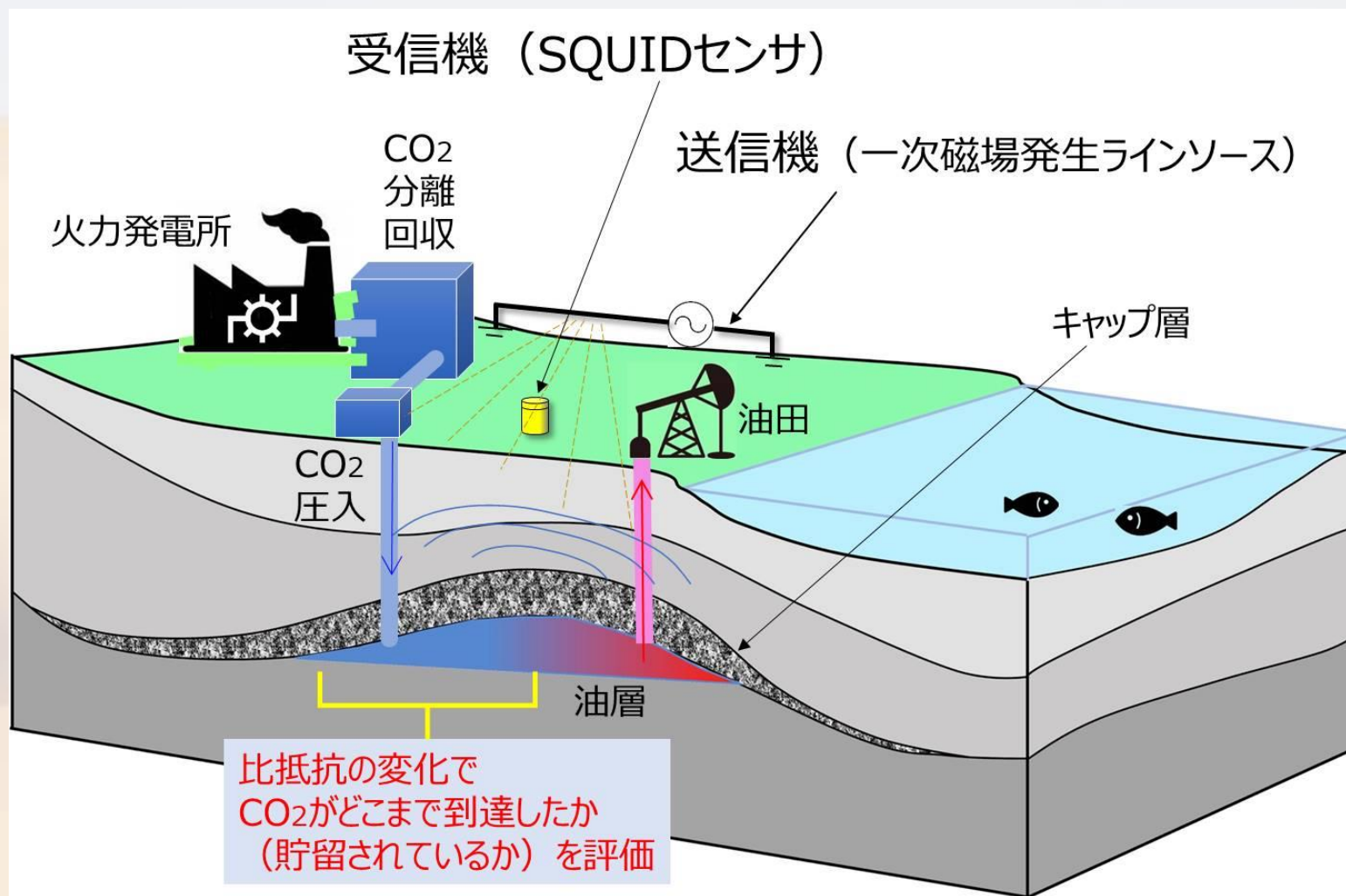
地熱探査に使用する地上設置型システム（SQUID-TEM）



探査深度～3000m

LN₂保持時間
移動を含む：～10h
静置：～17h

(2) 二酸化炭素地下貯留 (CCUS) と油層の有効活用



比抵抗の変化が大きく、電磁探査が有用

これまでの進捗状況



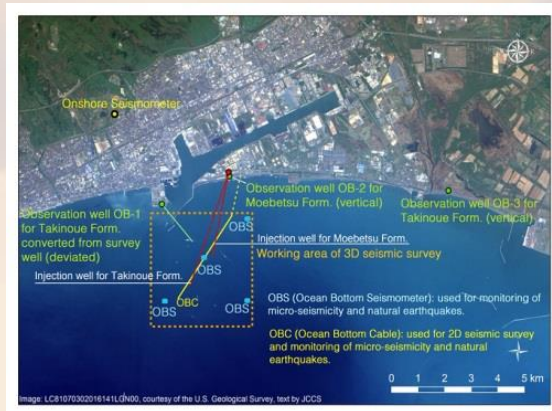
PTTEP（タイ国有石油会社）、JOGMECの
共同研究事業による野外試験（2017/11）
MINDECOとSUSTERAが実働部隊として参加

タイ Sirikit油田（地下2000mの水圧入の油層）
地区での計測試験（ラインソースを用いたTEM法）



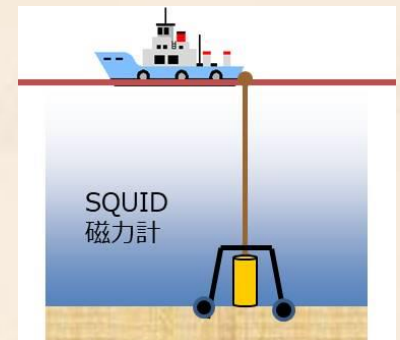
油層の比抵抗分布計測の可能性を実証

**TechnoImaging社（米国）との技術協力により
モニタリングの高精度化予定（協業契約締結済）
3成分測定、3D逆解析**

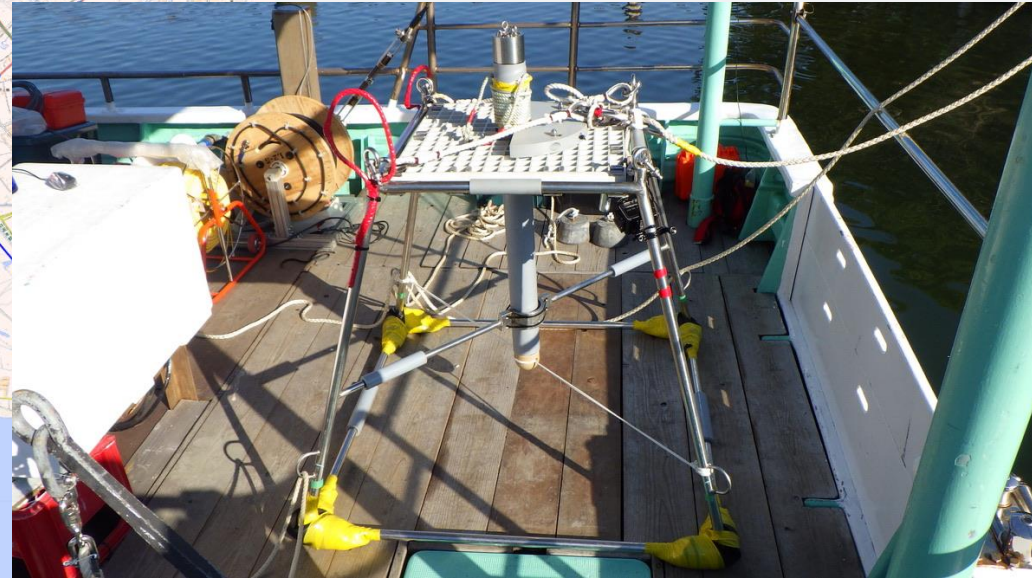


環境省プロジェクト（2018-2020）において海底下CCS
（苫小牧沖）のCO₂モニタリングのための基礎技術検証済

- 数値シミュレーションによる計測可能性検証
- 浅海域でのSQUID計測技術検証



多くの世界のCCUSプロジェクトでは海中での計測が必要

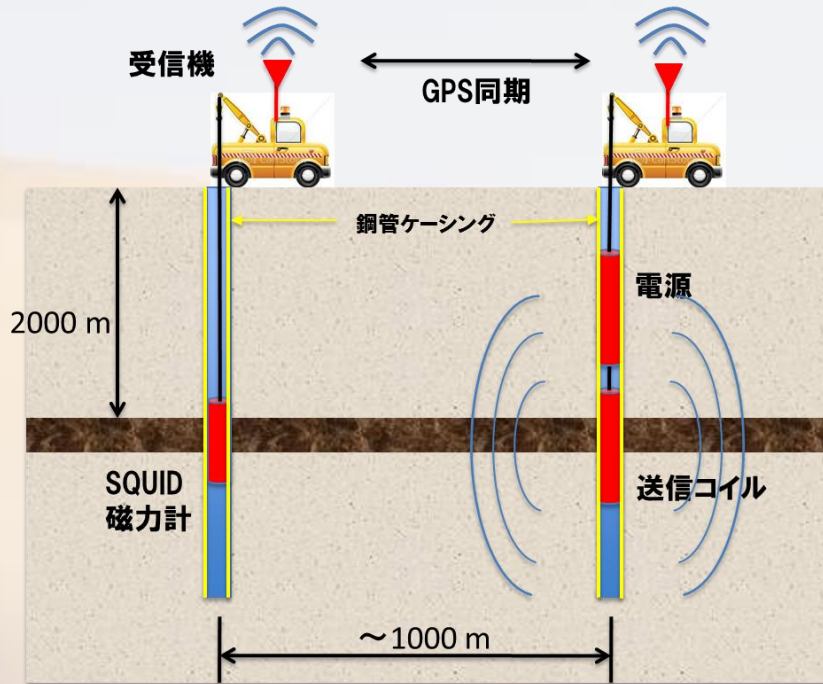


水深100m対応SQUIDシステム

低い環境負荷

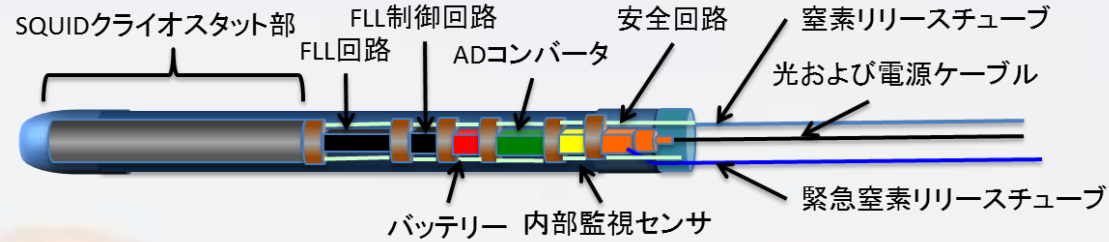
送信電流 100A
発生磁場 (100m) $200\text{nT} < 50\ \mu\text{T}$ (地磁気)

水深4500m対応SQUIDシステム



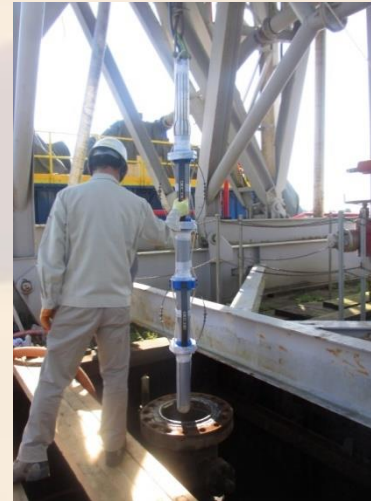
超電導磁気センサ(SQUID)を用いた
広域電磁検層システム(クロスホールタイプ)
の最終イメージ

- CO₂-EOR(Enhanced Oil Recovery)におけるCO₂到達状態の比抵抗によるモニタリングを目的
- SQUIDの低周波高感度により従来より1桁広域の検層、金属ケーシングを通した検層実現を期待
(過酷環境で使えるSQUID応用技術を開発)



JOGMECプロジェクトで開発したSQUID磁力計プローブ

耐圧70MPa以上のCFRP容器内に実装
蒸発窒素ガスをチューブを通してリリースすることで77 K維持



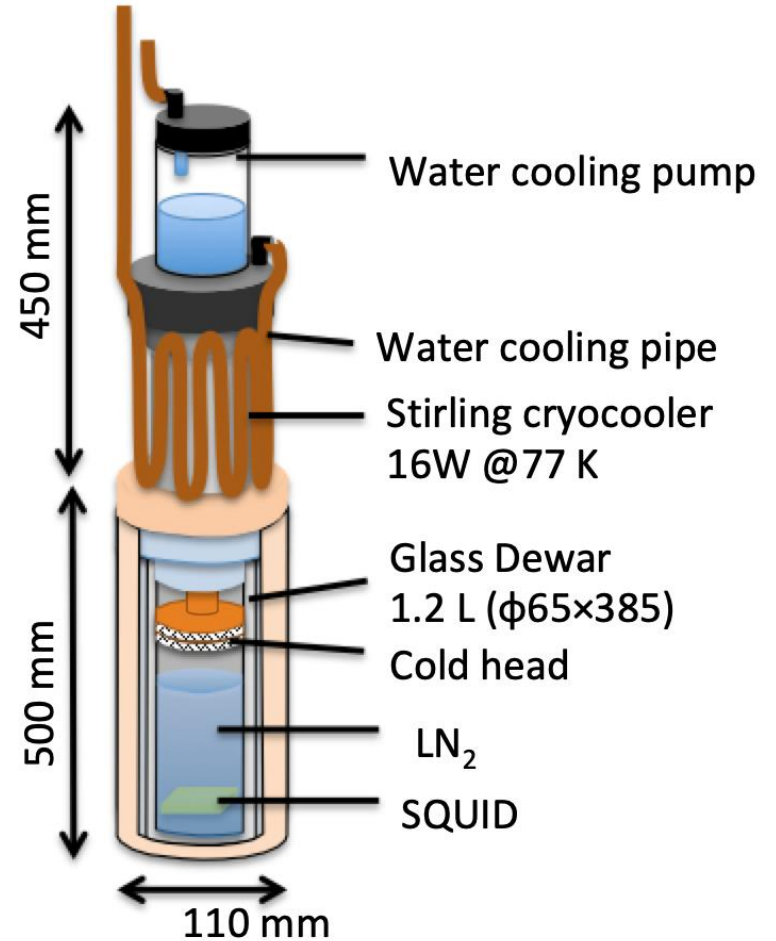
JOGMEC柏崎TFでの
試験の様子

坑井(水)中
深度270mでのTEM信号
受信を確認

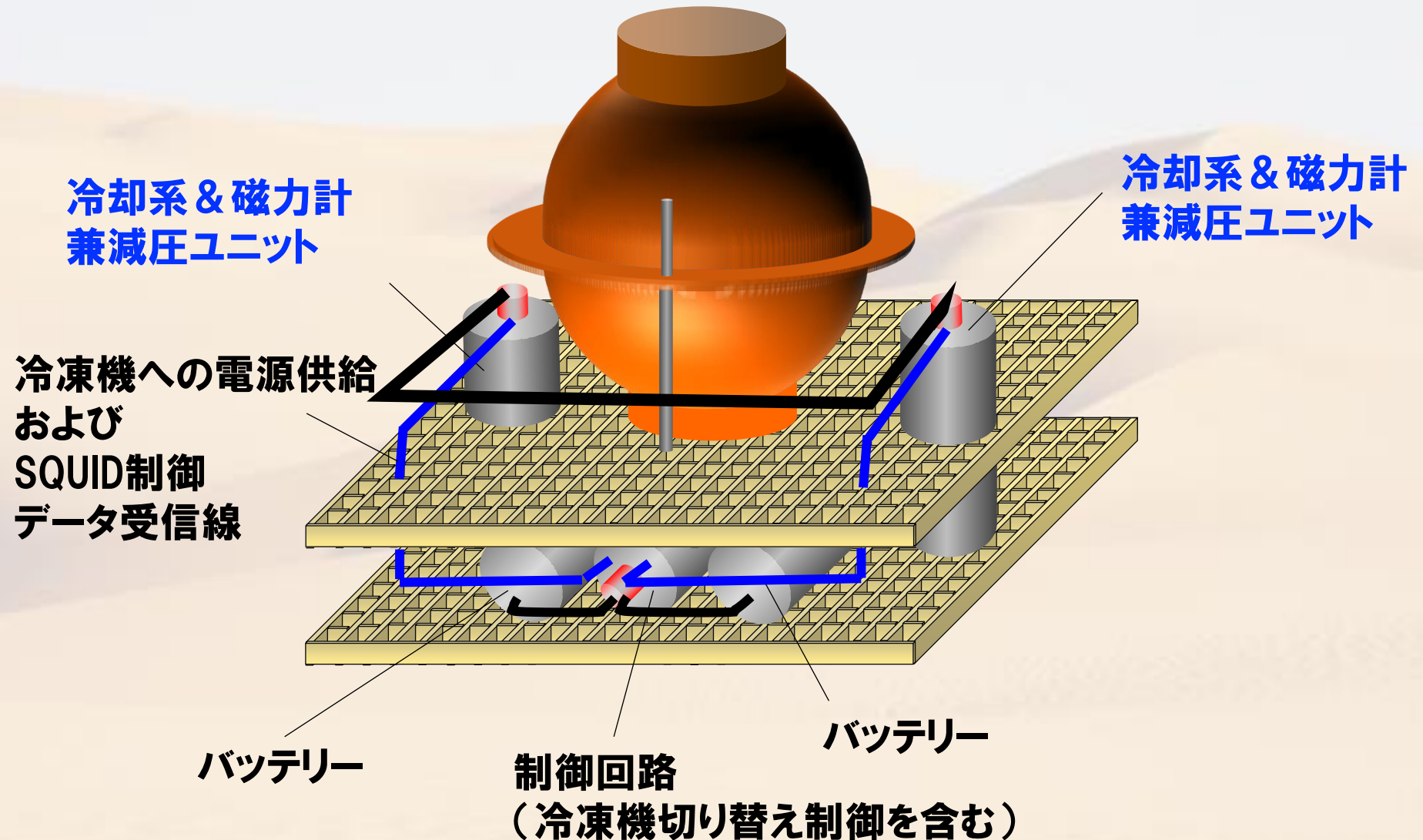
坑井内での受信は
高分解能が期待できるが
コスト的には不利

海上(offshore)用の
装置開発に展開可能

水中で長期にわたって運用できるシステム開発 (冷凍機併用ハイブリッド冷却システム)



海底磁力計: OBM(Ocean Bottom Magnetometer)



4. 今後の展開

低コストで貯留層内部をモニタリングできる技術がサービスを決する

日本

古来より金属資源にほぼ限定
資源上流サービスは脆弱

金属資源会社の
下流へのシフトで減退傾向
世界の資源界への発言力低下か

脱炭素社会の到来
新技術への期待

欧米

近代より石油にターゲット

資源上流サービスは統合で巨大化
例：シュルンベルジェ、ペトロリアムジオサービス

巨額な予算：弾性波探査が主力

新技術の登場で
地下モニタリングサービスの
統廃合・再編は必至

SQUID電磁探査技術で
大きなチャンス