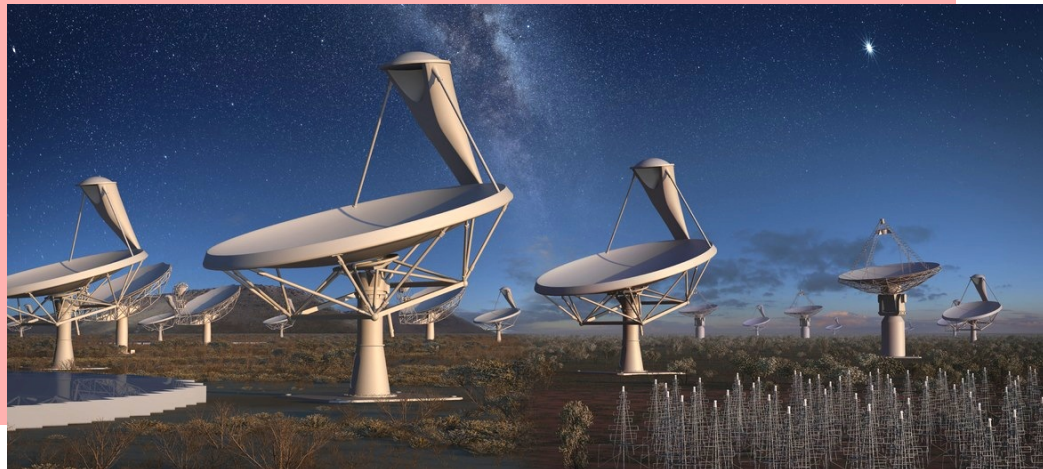


# SKA計画の 概要と進捗



Square Kilometre Array  
Japanese Consortium

## 赤堀卓也

鹿児島大学 / SKA機構(出向中)



SKA-Japan Workshop 2015

2015/3/3-5 @ 三鷹

## 1. SKA計画の概要

- 計画の外観
- 性能目標値

## 2. SKA計画の進捗

- 組織とスケジュール
- SKA1ベースラインデザイン(Low, Mid, Sur)
- 再ベースライン検討と仮デザイン審査

## 3. 日本SKAコンソーシアムの歩み

- 組織とこれまでの活動
- 技術開発の状況

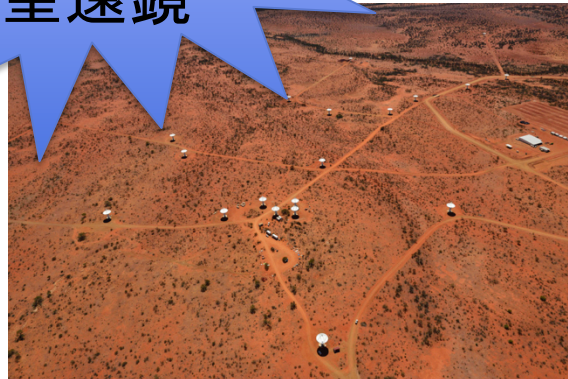
## 4. まとめ

# 1. SKA計画の概要 計画の外観

大陸  
望遠鏡

3

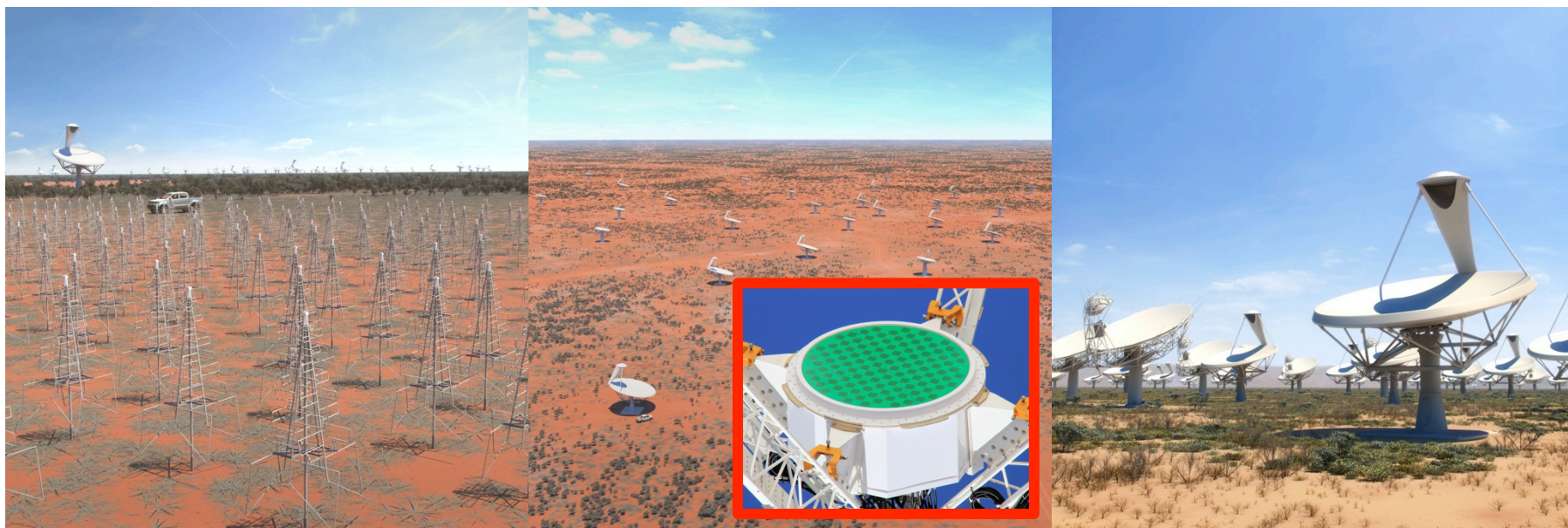
- ❖ 集光面積 1 km 級の電波干渉計
- ❖ 周波数 50 MHz から 30 GHz
- ❖ 開口アンテナ 100万台、15m鏡 2000台
- ❖ 最大基線長 3000 km
- ❖ アフリカ南部とオセアニアに建設
- ❖ 第1期(SKA1)と第2期(SKA2)
- ❖ 光ネットワーク、中央データ処理施設



# 1. SKA計画の概要

## SKA第1期 (SKA1)

- ❖ 建設2017-2023、初期科学運用2020-、本運用2023-2028
- ❖ 建設費~650M€、5年間運営費~250M€ (いずれも概算)



### SKA1-LOW 豪州

LPアンテナ 26万基

289基”35m鏡”×911台

### SKA1-SUR 豪州

15mSKA鏡 60台

+12m ASKAP鏡 36台

### SKA1-MID 南ア

15mSKA鏡 190台

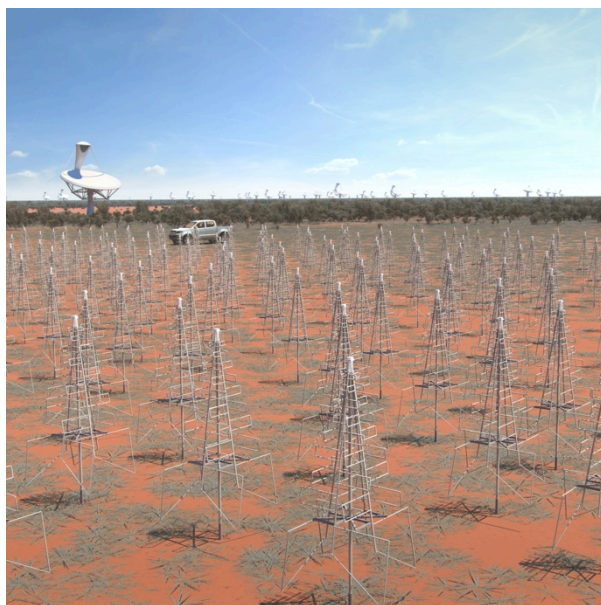
+13.5m MeerKAT鏡 64台

**フェイズド・アレイ・フィード(PAF)**

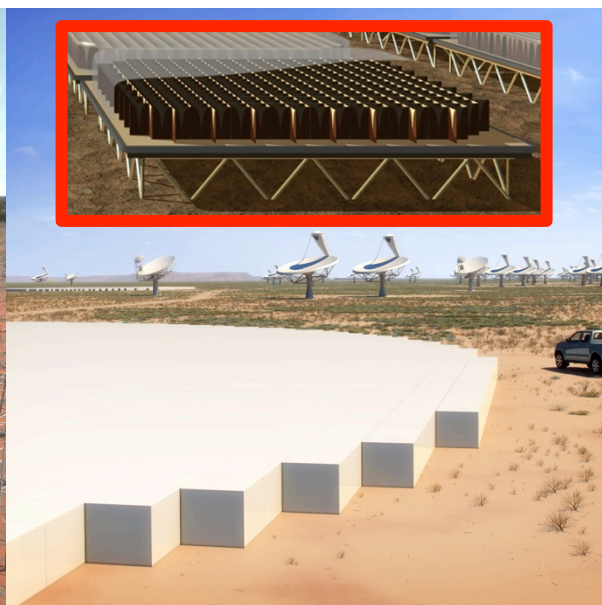
# 1. SKA計画の概要

## SKA第2期 (SKA2)

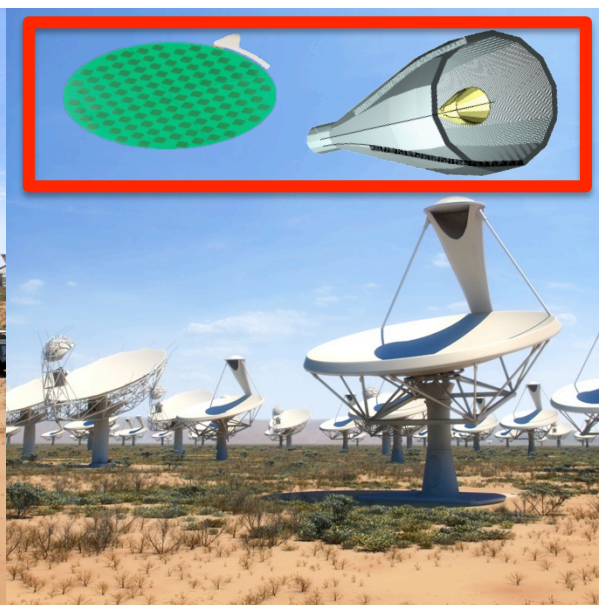
- ❖ 建設2023以降、運用2028-
- ❖ 建設費 >1500M€ (推定)



**SKA2-LFAA 豪州**  
LPアンテナ 100万台  
“35m鏡”



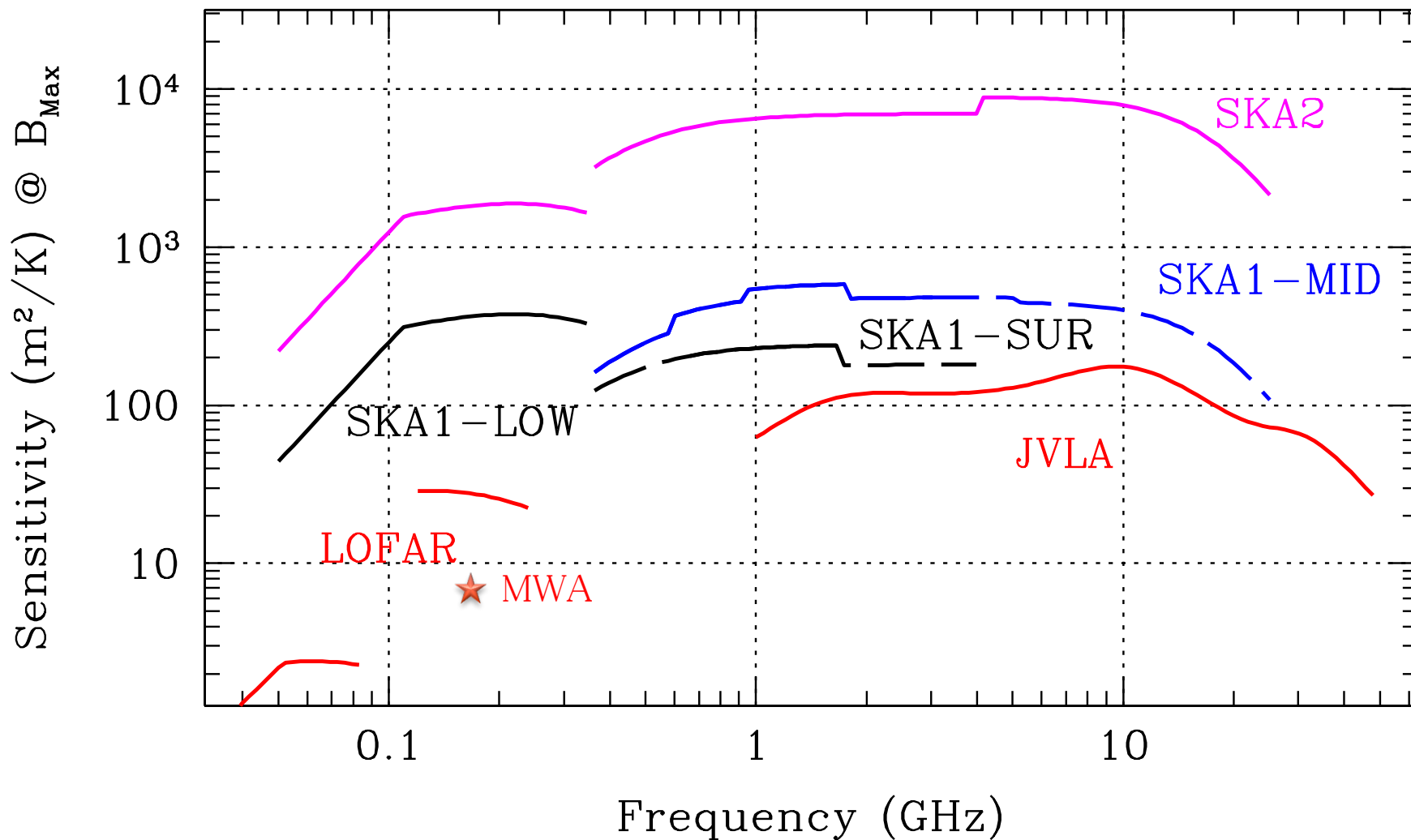
**SKA2-MFAA 南ア**  
250局  
高密度フェイズドアレイ  
技術(視野200平方度)



**SKA2-DISH 南ア**  
15mSKA鏡 2000台  
PAFか  
広帯域フィード(WBSFPF)

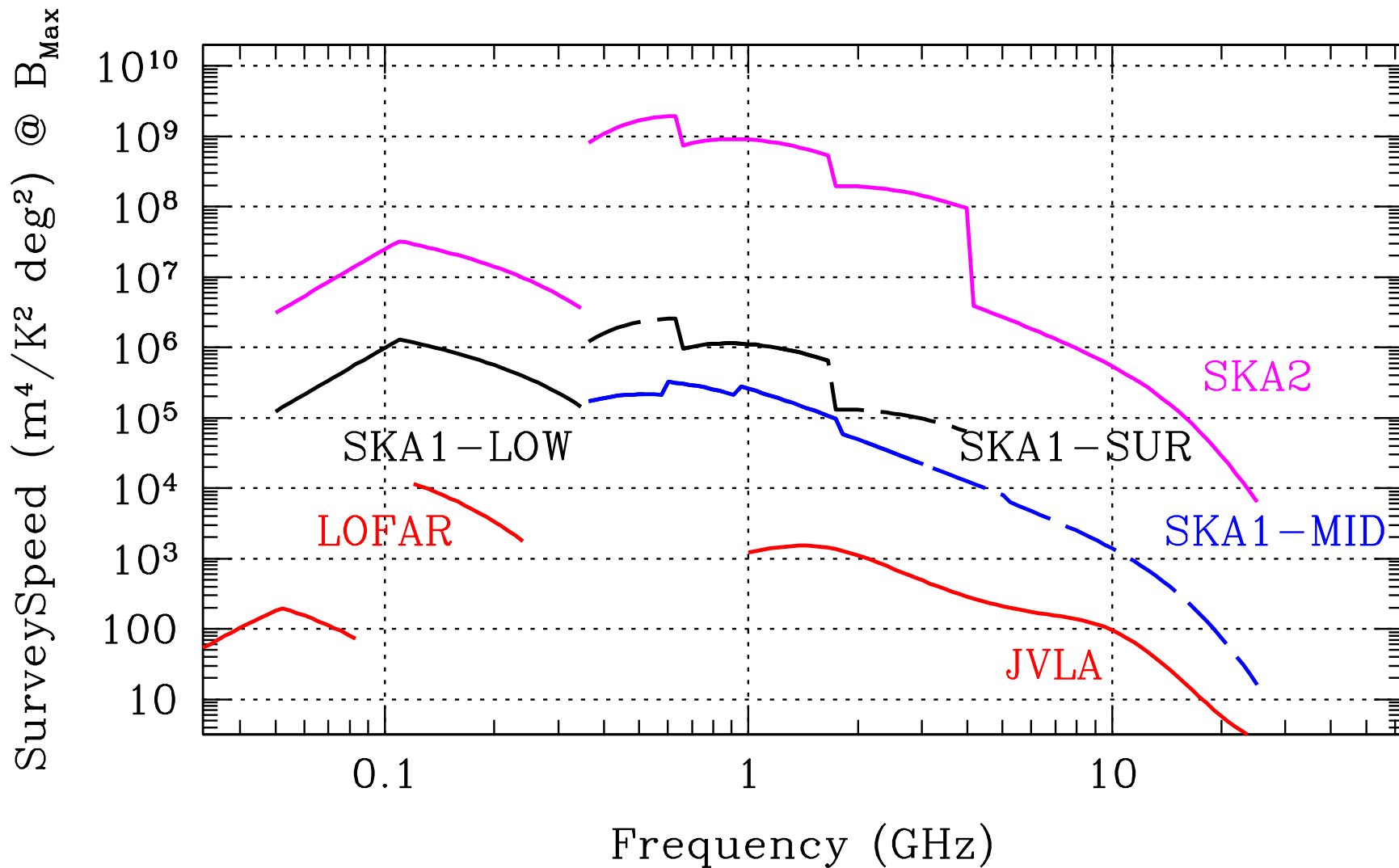
# 1. SKA計画の概要

## 目標感度 $A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$



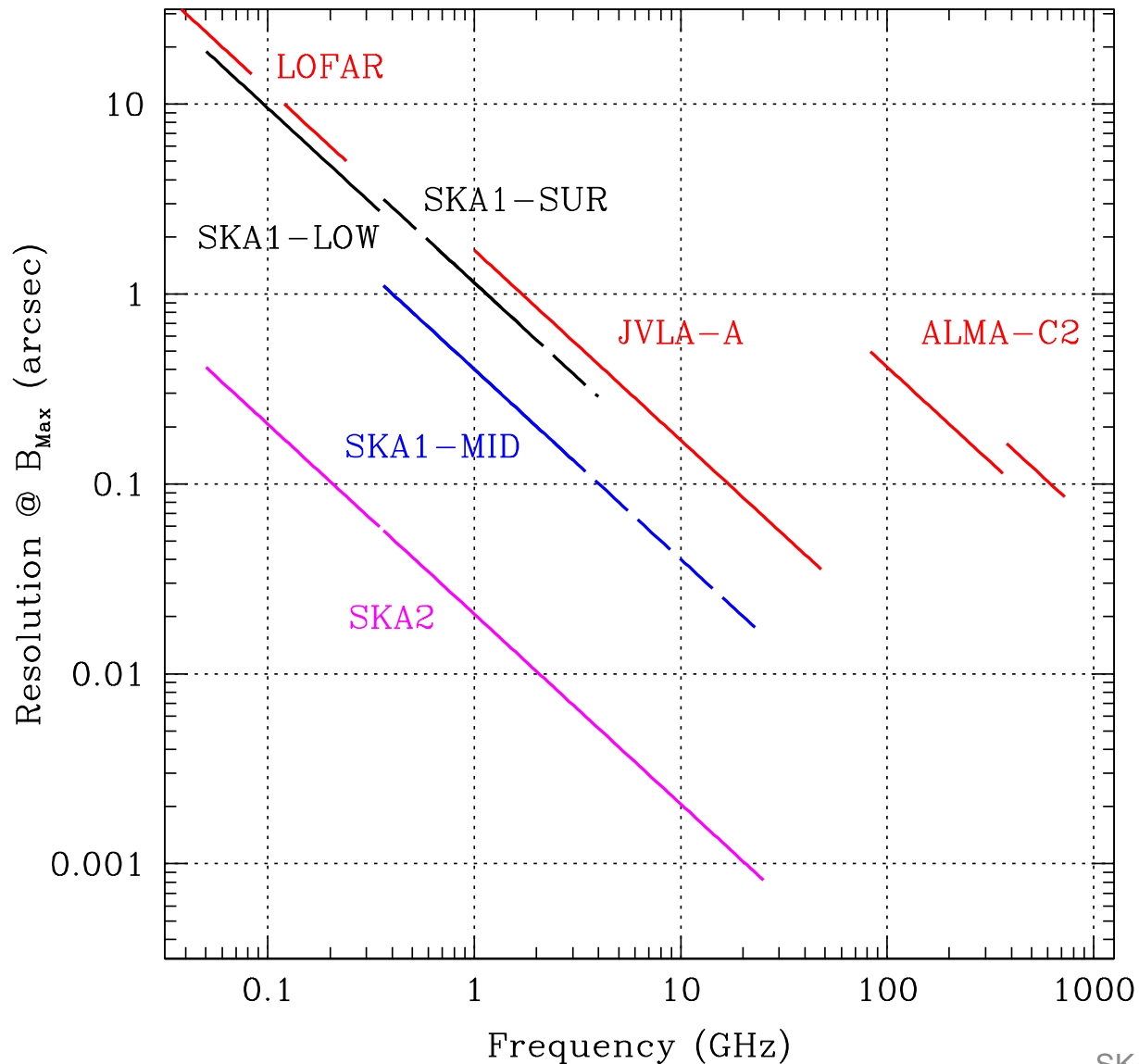
# 1. SKA計画の概要

## 目標サーベイ速度 $FOV^* (A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}})^2$



# 1. SKA計画の概要

## 目標角分解能 Beam FWHM





# 1. SKA計画の概要

## SKA1 Baseline Design: LOW

項目	値	備考
周波数レンジ	50 – 350 MHz	
感度(Aeff/Tsys)	970	@ 110 MHz, Tsys=830K
LOFAR	30	@ 120 MHz
MWA	7	@ 150 MHz
視野(FOV)	27平方度	@ 110 MHz
同時バンド幅	250 MHz	最大値
コア直径(Bcore)	1 – 2.5 km	2.5 → 3' @ 110 MHz
最大基線長(Bmax)	45 km	7" @ 110 MHz if 60 km
最小基線長(Bmin)	>35 m	ステーション直径
最大チャンネル数(Nchan)	256,000	
周波数分解能	1 kHz	

# 1. SKA計画の概要

## SKA1 Baseline Design: MID

項目	値	備考
周波数レンジ	0.35 – 1.76 MHz	SPFs Band1 & Band2
アンテナ対応	20 GHz	最小値
感度(Aeff/Tsys)	<del>1,630</del> 1,309	@ 1.67 GHz, Tsys=20K
Arecibo	1,100	@ 1.67 GHz
JVLA	265	@ 1.67 GHz
視野(FOV)	<del>0.49</del> 0.31平方度	@ 1.67 GHz
同時バンド幅	770 MHz	最大値
コア直径(Bcore)	1 – 2.5 km	
最大基線長(Bmax)	200 km	0.22" @ 1.67 GHz
最小基線長(Bmin)	>15 m	アンテナ直径
最大チャンネル数(Nchan)	256,000	
周波数分解能	3.9 kHz	1.2 km/s @ 0.9-1.67 GHz

# 1. SKA計画の概要

## SKA1 Baseline Design: SUR

項目	値	備考
周波数レンジ	0.65 – 1.67 MHz	PAF Band2
アンテナ対応	20 GHz	最小値
FFFoM=FOV*(Aeff/Tsys) <sup>2</sup>	2,750,000	@ 1.67 GHz, Tsys=30K
ASKAP	127,000	@ 1.67 GHz
JVLA	17,600	@ 1.67 GHz
視野(FOV)	18平方度	@ 1.67 GHz
同時バンド幅	500 MHz	最大値
コア直径(Bcore)	1 – 2.5 km	
最大基線長(Bmax)	50 km	0.9" @ 1.67 GHz
最小基線長(Bmin)	>15 m	アンテナ直径
最大チャンネル数(Nchan)	256,000	
周波数分解能	1.95 kHz	0.9 km/s @ 0.9-1.67 GHz

### ❖ SKAメンバー

- 11ヶ国が出資
- 印が11番目の参加国として参入
- 英予算獲得(23M€+120M€)
- 独2014年度をもって脱退(全体の2.5%拠出。大勢に影響なし)
- 日米露仏韓西葡などが関心

### ❖ SKA機構

- 本部: 英Jodrell Bank観測所内
- 2018年に本部を移転
  - 2015/3/3-5 board会議で決定
  - 英Manchesterか伊Padua

SKA関係国



SKA本部



## 2. SKA計画の進捗

# SKA機構本部(SKAO)

常勤スタッフ 46名  
(2014年11月現在) **13**



**機構長**  
Philip Diamond



**副機構長・計画長**  
Alistair McPherson



**科学部門長**  
Robert Braun

**科学部門メンバー**  
(科学系の設計・監督)



**設計部門責任者**  
Tim Cornwell



**設計部門副責任者**  
Peter Dewdney

**設計部門メンバー**  
(ドメインスペシャリスト、工学系の設計・監督)



**SE部門長**  
Tim Stevenson

**SE部門メンバー**  
(工学系の設計・検査)

**管理・人事部門長**  
Colin Greenwood

**管理・人事部門メンバー**  
(財務・総務・ITなど)

**政策部門長**  
Simon Berry

**政策部門メンバー**  
(ポリシー・産業界)

**広報部門メンバー**  
(ウェブ・月刊誌)

**プロジェクト調整スタッフ**  
(計画調整・構成)

**プロジェクトマネージャー集団**  
(各コンソーシアムの連絡・調査・管理)

WPC



## 2. SKA計画の進捗 SKAOからのメッセージ



### ❖ SWG (Science Working Group)

- Epoch of Reionization (宇宙再電離)
- Continuum (連続波)
- Cosmology (宇宙論)
- Cradle of Life (宇宙生命)
- HI galaxy science (HI銀河進化)
- Magnetism (宇宙磁場)
- Pulsars (パルサー)
- Transients (突発天体)

### ❖ FG (Focus Group)

- Our Galaxy, Solar Physics, Spectral Line, VLBI
- (天の川銀河、太陽物理、スペクトル線、超長基線干渉)

## 2. SKA計画の進捗 技術開発・設計の共同体

### ❖ WPC(Work Package Consortia)

❖ 2013年設立。20ヶ国100機関以上が参加



DSH



LFAA



MFAA



WBSPF



SaDT



CSP



SDP



TM



AIV



INFRA SA

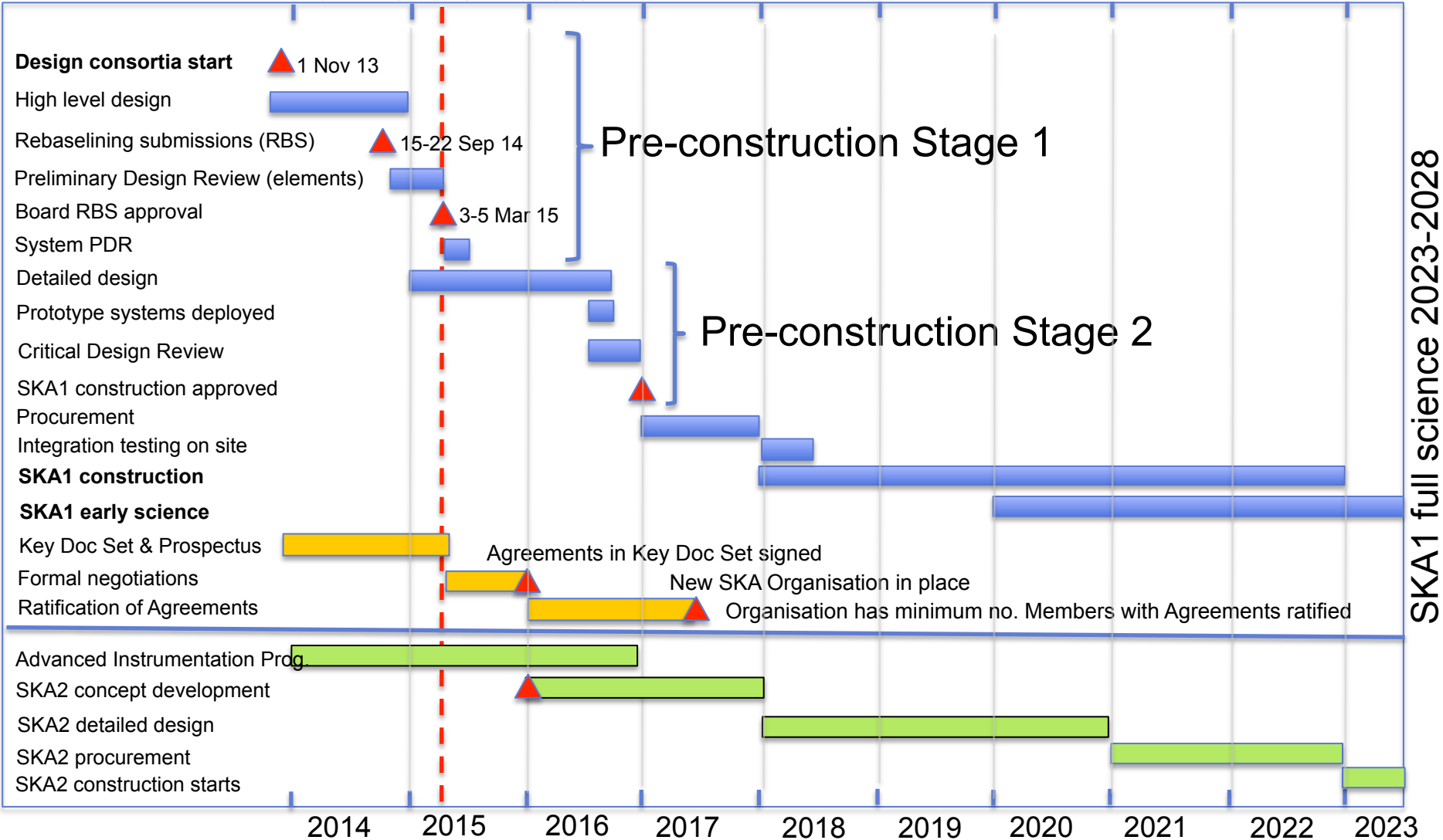


INFRA AU



KEY: Blue = SKA1 science & engineering; orange = policy; green = SKA2

提供: Alistair McPherson, Robert Braun



SKA1 full science 2023-2028

### ❖ 2013年3月公開、基本設計=3アンテナ、2システム

- SKA1-LOW & SKA1-SUR (Australia system)
- SKA1-MID (South Africa system)

### ❖ デザインの思想

- キーサイエンス(EoR & Pulsar)の実施能力に注視する
- さもなくば様々な観測への自由度を残す
- 設計的に境界条件を決める。できもしないものはデザインしない
- SKA2への拡張性を考慮する(スケーラビリティとか)

### ❖ 最終デザインではない

- Science Assessment & Change Proposals (2013-2014 済)
- RBS (2014-2015 済) – 後述
- PDR (2014-2015 ほぼ済) – 後述

### ❖ コスト解析に基づいた最終デザイン

### ❖ SKA1 Baseline Design (2013年3月) の修正

- 全機能を盛り込むと650M€上限では足りない→機能の絞り込みへ

### ❖ RBS 2014

#### 1. SKAO+WPCによる経費削減案の錬成

- サブ要素→要素→システム→実運用の4段階
- サイエンスへの影響を数値化し、消去法

#### 2. 暫定科学評価委員(SRP)

- サイエンスへの影響、リスクの評価

#### 3. 科学技術諮問委員(SEAC)

- RBSの過程は正しく進められたか?
- SKAOの検討状況は十分であったか?
- RBSについての指針

赤堀私見

✓ SKAOのRBSの過程は  
特定の科学・技術に偏らない  
ための十分な配慮あった

✓ 専門家の諮問は多角的で  
意義とリスクを見定めるプロ  
フェッショナルなものだった

### ❖ 機構長が提言。Board会議(3/3-5)で決定

- 内容はまだ公表できません

### ❖ 指定審査員ならびにSKAO担当者による仮審査

- WPCが準備したデザイン要素の文書は数100にも及ぶ

### ❖ 審査のその後

- 審査で明らかになった課題を早急に解決
- Re-baseliningが与える影響を評価
- 選択肢の絞り込みへ

### ❖ 7月頃に「設計パック」が審査される

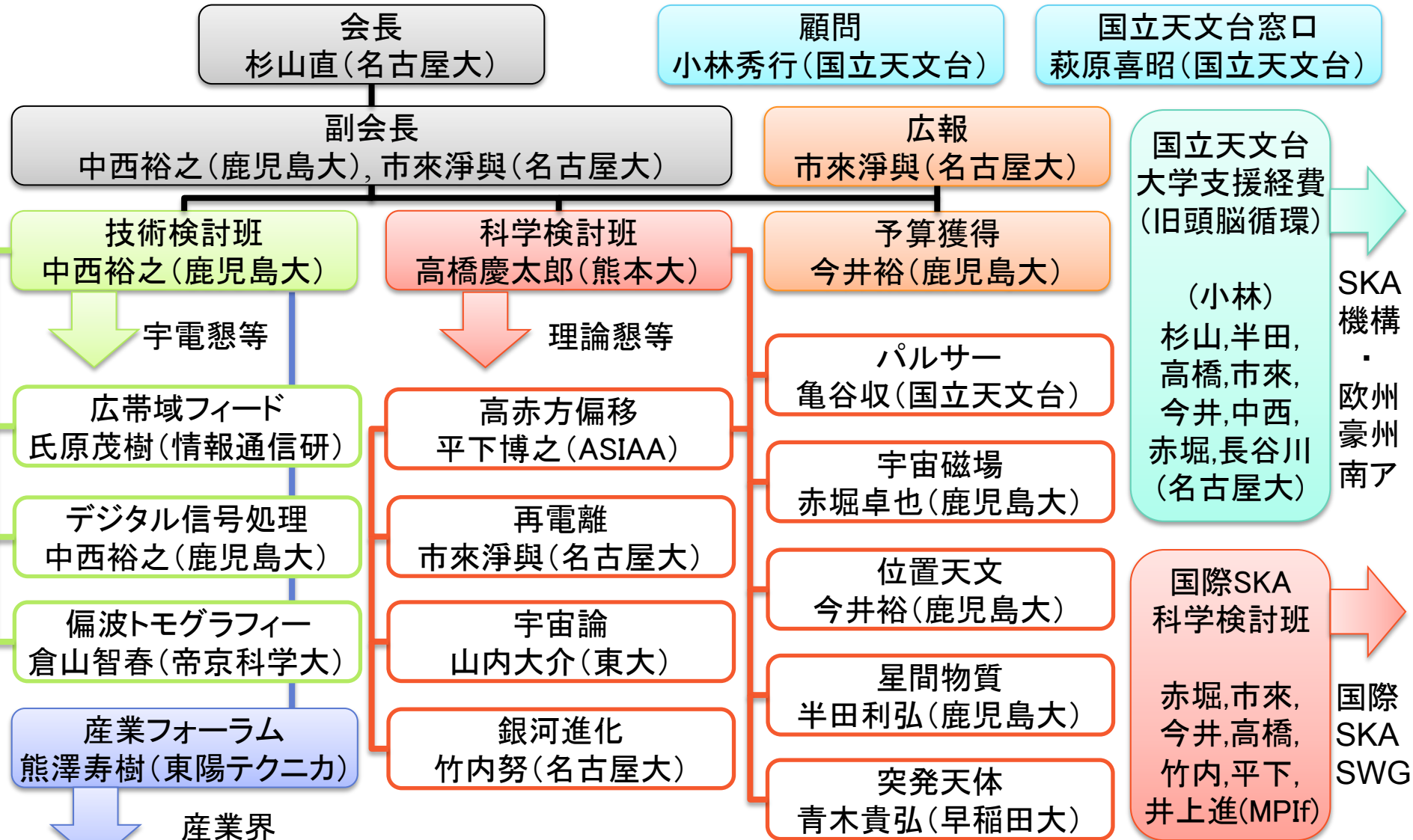
- 詳細設計にむけた大筋の装置仕様が見えてくる
- お披露目は秋ごろか？

### ❖ 詳細設計(pre-construction stage 2)へ移行

# 3. 日本SKAコンソーシアムの歩み SKA-JP(2008年5月設立)

会員161名

(2015年2月現在) 21



### 3. 日本SKAコンソーシアムの歩み

# SKA-JP主催の研究会

- ❖ 2008.11 SKA Japan Workshop 2008 @三鷹
- ❖ 2010.11 SKA Japan Workshop 2010 @三鷹
  - 2012.06 SKAサイエンス会議「宇宙磁場」@福岡
  - 2013.02 SKAサイエンス会議「high-z」@京都
- ❖ 2013.06 SKA East Asia Workshop 2013 @名古屋
  - 2013.09 SKAサイエンス会議「宇宙磁場」@水沢
  - 2013.12 宇電懇シンポ2013@三鷹
  - 2014.03 SKAサイエンス会議「high-z」@京都
  - 2014.11 SKAサイエンス会議「宇宙磁場」@三鷹
- ❖ 2015.03 SKA Japan Workshop 2015 @三鷹



## ❖ SWG (Science Working Group)

- 宇宙再電離(市來・竹内・井上進)
- 連続波(なし)
- 宇宙論(高橋・井上進)
- 宇宙生命(なし)
- HI銀河進化(市來・竹内・平下)
- 宇宙磁場(赤堀・高橋)
- パルサー(今井)
- 突発天体(なし)

## ❖ FG (Focus Group)

- 天の川(今井), 太陽物理(なし)
- スペクトル線(なし), VLBI(今井)

## ❖ 日本からもっと参加するべきです

国際SKA  
サイエンスブック  
日本人執筆参加者  
(集計中)

赤堀・市來・井上・  
出口・今井・大栗・  
郡・高橋・竹内・  
田代・平下・水野・  
山内

連携メンバーから  
始めてみたら？  
(SKAO science team)

## ❖ 既存装置によるセンチ波天文学

- 電波連続波、偏波連続波、HIやOHの輝線、観測とデータ解析

## ❖ SKA試験機などへの実装

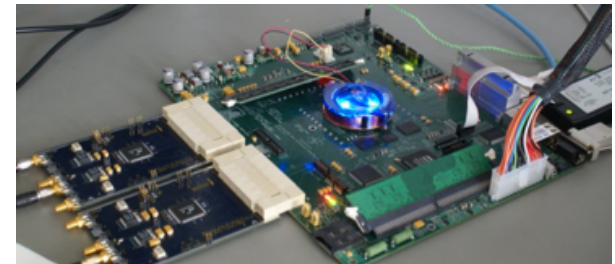
- ASKAP/POSSUMのデータパイプラインの開発
- LOFAR/MWAのデータ校正ソフト開発への協力
- 臼田64m鏡の科学運用へ向けた整備



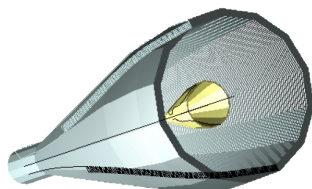
臼田64m鏡

## ❖ 新しい技術開発への取り組み・・・**広帯域**

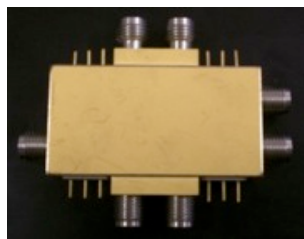
- 広帯域フィード(Gala-V)
- ホモダイン受信機(高速AD変換)
- デジタル信号処理(FPGAボード)
- ソフトウェア開発(トモグラフィ)



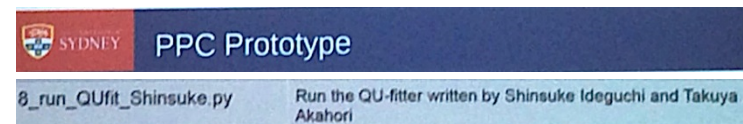
電波天文専用FPGAボード



広帯域フィード



高速AD変換器  
ホモダイン受信機



高速・堅牢トモグラフィソルバー



### 3. 日本SKAコンソーシアムの歩み

# 開発・設計への参加状況

- ❖ 複数のWPCに参加表明をしたが加入していない
- ❖ 原因不明。なににせよ機能しなかった → そこで**SKA本部と直通の連絡体制**を構築することにした(リエゾン)



DSH



LFAA



MFAA



WBSPF



SaDT



CSP



SDP



TM



AIV



INFRA SA



INFRA AU

## ❖ キーワード「高信頼性」「低電力」「低コスト」

- **冷却システム** (特にPAF。Band2で1.8m直径あるものを安定的に冷やす)
- **ビーム形成器** (SKA1-LOWだけで2.7 MW消費)
- **デジタル信号処理全般** (高性能、システムRFI軽減)
- **通信技術** (100万もあるLFAAのRFファイバーリンク)
- **MFAA** (全てが開発課題)
- **PAF** (システム安定性や有効FOV向上)
- **WBSPF** (帯域拡張と安定したゲイン)
- **CSP** (GPGPUやFPGAの相関器、相関アルゴリズム)
- **ビッグデータ** (データ収集、転送、保存、処理)
- **SDP** (LFAAの較正、自動データパイプラインの開発)

## ❖ SKA機構は日本の貢献に期待している

- 精密で壊れない！省エネスパコン！山手線スゴイ(管理能力)！
- 世界シェアスゴイ(材料、機械、製造、制御、・・・)

## ❖ 人類史上最大級の大陸望遠鏡

- 高感度、高分解能、広視野、広帯域
- 世界11ヶ国が参加＋数か国が関心

## ❖ SKA計画第一期は順調に推移している

- 機能強化されたSKA機構、世界のSWGとWPC
- ベースラインデザイン & 再ベースライン検討
- 仮デザイン審査(PDR)も大詰め

## ❖ SKA参加に向けた日本の取組み

- 機能強化されたSKAJP、国際協力の具体的成果
- 国内での技術開発も進捗、WPCへの接続急ぐ
- SKA機構は日本の貢献に期待している

# おまけ SKAサイトの日本語サイト

The image shows two screenshots of the SKA website. The top screenshot is the main English website, featuring the SKA logo, navigation menus, and a featured news section with an article about an art/astronomy exhibition in South Africa. The bottom screenshot is the Japanese version of the website, titled 'SKA JAPAN SQUARE KILOMETRE ARRAY', which includes a Japanese flag and text describing Japan's involvement in the project, such as its participation in the Science Council of Japan and the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ).

## ❖ RBSの検討材料として使われた13の科学課題

- SKA1の科学運用5年間の~70%(~30k hrs)を想定
- 建設費650M€で全部または一部実施可能なRBSが検討された

領域(順不同)	科学課題	利用設備	単独要求時間*
CD/EoR	EoR - I. Imaging	LOW	5000
CD/EoR	EoR - II. Power spectrum	LOW	10000
Pulsars	Reveal pulsar population	MID	13200
Pulsars	High precision timing	MID	4800
HI	Resolved HI out to $z \sim 0.8$	SUR	5000
HI	ISM in the nearby Universe.	MID	2000
HI	ISM in our Galaxy	SUR	3000
Transients	Fast Radio Bursts	MID	10000
Cradle of Life	Map dust grain growth	MID	6000
Magnetism	All-Sky magnetic fields	SUR	17500
Cosmology	Gravity on super-horizon scales.	SUR	5500
Cosmology	Non-Gaussianity and the matter dipole	SUR	2500
Continuum	Star formation history of Universe	MID + SUR	6000 + 5300

\* 調整前。SKAO Science Teamが調整を行い、実施可能な相乗り(と妥協)観測プランが最終的に検討対象となった

		eMERLIN	JVLA	GBT	GMRT	Parkes MB
$A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$	m <sup>2</sup> /K	60	265	276	250	100
FoV	deg <sup>2</sup>	0.25	0.25	0.015	0.13	0.65
Receptor Size	m	25	25	101	45	64
Fiducial frequency	GHz	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Survey Speed FoM	deg <sup>2</sup> m <sup>4</sup> K <sup>-2</sup>	9.00×10 <sup>2</sup>	1.76×10 <sup>4</sup>	1.14×10 <sup>3</sup>	8.13×10 <sup>3</sup>	6.50×10 <sup>3</sup>
Resolution	arcsec	10-150 × 10 <sup>-3</sup>	1.4 - 44	420	2	660
Baseline or Size	km	217	1 - 35	0.1	27	0.064
Frequency Range	GHz	1.3-1.8, 4-8, 22-24	1 - 50	0.2 - 50+	0.15, 0.23, 0.33, 0.61, 1.4	0.44 to 24
Bandwidth	MHz	400	1000	400	450	400
Cont. Sensitivity	μJy-hr <sup>-1/2</sup>	27.11	3.88	5.89	6.13	16.26
Sensitivity, 100 kHz	μJy-hr <sup>-1/2</sup>	1714	388	373	411	1029
SEFD	Jy	46.0	10.4	10.0	11.0	27.6

	LOFAR	FAST	MeerKAT	WSRT	Arecibo	ASKAP	SKA1-survey	SKA1-low	SKA-mid
$A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$	61	1250	321	124	1150	65	391	1000	1630
FoV	14	0.0017	0.86	0.25	0.003	30	18	27	0.49
Receptor Size	39	300	13.5	25	225	12	15	35	15
Fiducial frequency	0.12	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.67	0.11	1.67
Survey Speed FoM	5.21×10 <sup>4</sup>	2.66×10 <sup>3</sup>	8.86×10 <sup>4</sup>	3.84×10 <sup>3</sup>	3.97×10 <sup>3</sup>	1.27×10 <sup>5</sup>	2.75×10 <sup>6</sup>	2.70×10 <sup>7</sup>	1.30×10 <sup>6</sup>
Resolution	5	88	11	16	192	7	0.9	11	0.22
Baseline or Size	100	0.5	4	2.7	225	6	50	50	200
Frequency Range	0.03 - 0.22	0.1 - 3	0.7 - 2.5, 0.7 - 10	0.3 - 8.6	0.3 - 10	0.7-1.8	0.65-1.67	0.050 - 0.350	0.35-14
Bandwidth	4	800	1000	160	1000	300	500	250	770
Cont. Sensitivity	266.61	0.92	3.20	20.74	0.89	28.89	3.72	2.06	0.72
Sensitivity, 100 kHz	1686	82	320	830	89	1582	263	103	63
SEFD	45.2	2.2	8.6	22.3	2.4	42.5	7.1	2.8	1.7

施設	バンド	周波数レンジ (MHz)	バンド比
SKA1-LOW	N/A	50-350	7:1
SKA1-SUR	1	350-900	2.57:1
	2	650-1670	2.57:1
	3	1500-4000	2.67:1
SKA1-MID	1	350-1050	3:1
	2	950-1760	1.85:1
	3	1650-3050	1.85:1
	4	2800-5180	1.85:1
	5	4600-13800	3:1
	6??	??-24000 (SKA2)	??

	単位	JVLA	LOFAR	ASKAP	Meer KAT	SKA1- LOW	SKA1- SUR	SKA1- MID
$A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$	m <sup>2</sup> /K	265	61	65	321	1000	391	1630
視野	deg <sup>2</sup>	0.25	14	30	0.86	27	18	0.49
SSFoM FOV*( $A_{\text{eff}}/T_{\text{sys}}$ ) <sup>2</sup>	10000* deg <sup>2</sup> *m <sup>4</sup> /K <sup>2</sup>	1.8	5.2	12.7	8.9	2700	275	130
参照周波数	GHz	1.4	0.12	1.4	1.4	0.11	1.67	1.67
分解能	arcsec	1.4-44	5	7	11	11	0.9	0.22
周波数帯域	GHz	1- 50	0.03- 0.22	0.7- 1.8	0.7-2.5, 0.7-10	0.05- 0.35	0.65- 1.67	0.35- 14
バンド幅	MHz	1000	4	300	1000	250	500	770
連続波 感度	μJy/hr <sup>1/2</sup>	3.88	266.61	28.89	3.20	2.06	3.72	0.72
100 kHz 感度	μJy/hr <sup>1/2</sup>	388	1686	1582	320	103	263	63



変数	値	周波数 (GHz)	望遠鏡	引用	コメント
積分時間(輝線)	240 hr	1.2	WSRT	Verheijen+ 07	
rmsノイズレベル (連続線)	2.7 $\mu$ Jy/beam		VLA	Owen & Morrison 08	1.63" x 1.57" CLEAN beam
時間分解能	2 ns	1.4	Arecibo	Hankins+ 03	
線形偏波純度	< 0.1 % (> 30 dB)	5.5, 8.3	WSRT	Weiler & Wilson 77	on-axis
円偏波純度	< 0.03% (> 35 dB)			Wilson & Weiler 97	on-axis
一枚鏡偏波純度	(> 37 dB)		Effelsberg	Reich+ 78	
同時バンド幅	1 GHz	1 – 3	GBT	NRAO	
	1 GHz	1 – 2	EVLA	NRAO	
	2 GHz	2 – 4	EVLA	NRAO	
	2 GHz	1 – 3	EVLA	NRAO	