

野辺山 45m 望遠鏡搭載 7BEE 受信機の開発進捗

○宮戸健, 酒井剛(電気通信大学)

西村淳, 宮澤千栄子, 高橋敏一, 山田麟(国立天文台野辺山宇宙電波観測所)

増井翔, 山崎康正, 立松健一(国立天文台)

小川英夫, 大西利和(大阪公立大学)坂井南美(理化学研究所), 徳田一起(香川大学)

概要(Abstract)

星形成の初期段階を解明するため、野辺山 45m 電波望遠鏡の特性を活かした広帯域マルチビーム受信機 7BEE を開発した。本講演では 7BEE の開発目的や特徴に加え、試験運用中に判明したトラブルや IF 系の改修について紹介する。70GHz 帯は IF 調整と試験観測を完了し、今シーズンは同帯域の共同利用観測を開始した。

1. はじめに

これまでの研究により、星そのものの進化過程については理解が大きく進展してきた。一方で、ガスから星へと至る進化過程については、未だ不明な点が多く残されている。これは、星形成の進行に伴って周囲のガスが散逸し、星形成以前の物理・化学的情報が失われてしまうためである。

この問題に対し、我々の研究グループは重水素化分子に着目した観測的研究を進めてきた。重水素化分子とは、分子中の軽水素 (H) が重水素 (D) に置換された分子である。宇宙空間における重水素比 (D/H) は通常きわめて低いが、星形成直前の低温・高密度環境において著しく増大することが知られている。この性質から、重水素化分子は星形成の極初期状態を探る有力なトレーサーとして注目されている。

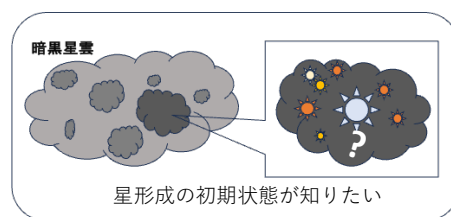


図 1：研究動機

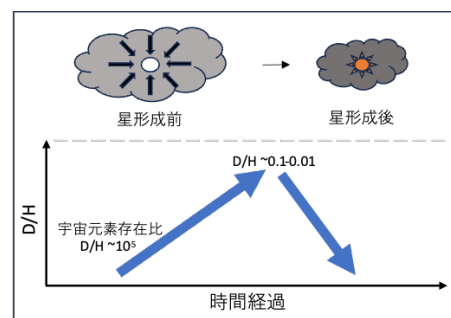


図 2：重水素比の重要性

2. 7BEE (7-BEam Equipment for the Nobeyama 45m Telescope)

7BEE は、野辺山 45m 電波望遠鏡(以下 45m 鏡)における次世代の広域・高効率観測を目的として開発されたマルチビーム受信機であり、主に 2 つの科学目標を掲げている。1 つ目の目標は、重水素化分子観測による星形成の極初期段階の解明である。野辺山ではこれまで、70 GHz 帯に存在する重水素化分子輝線の観測を目的として、T70 受信機を開発し研究を進めてきた。7BEE は先行研究を発展させ、より高いサーベイ効率と広い周波数帯域を活かした観測を可能にすることを目指している。2 つ目の目標は、一酸化炭素 (CO) 輝線による広域サーベイである。CO は、分子雲の主成分である水素分子のトレーサー

一であり、ガス構造の理解に不可欠な分子である。野辺山 45m 望遠鏡は、単一鏡かつ大口径という特性を活かし、高い観測効率を実現するために、BEARS や FOREST など各時代において最先端かつ高感度な広帯域マルチビーム受信機を開発・運用してきた。その結果、広域サーベイ観測の分野において世界をリードする成果を挙げている。

7BEE は、72-116 GHz を観測可能な広帯域両偏波受信機を 7 系統搭載した受信機である。本受信機の最大の特徴は、初段にスウェーデンのメーカーが開発した 67-116 GHz をカバーする冷却低雑音増幅器 (Cryogenic Low Noise Amplifier; CLNA) ^[1] を直列 2 段構成 (合計 28 個) で採用し、受信機雑音温度 (T_{RX}) の大幅な低減を図っている点にある。これに伴い、その他の RF コンポーネントについても、CLNA の広帯域特性に最適化する形で、大阪公立大学主導のもと新規に開発・設計を行った。具体的には、広帯域反射防止レンズ (AR レンズ)、直交偏波分離器 (Orthomode Transducer; OMT)、および周波数分離器 (Triplexer) である。7BEE では ALMA Band 2 向けに開発された広帯域ホーン^[2]を採用しており、この RF 特性に合わせて、レンズ表裏面に 1.2 mm 間隔のスパイク構造を直交配置することで、低反射かつ高い開口率を両立した AR レンズを新たに開発した^[3]。OMT は冷却系内部に組み込まれることから、低反射特性を有する Double Ridge Boifot junction 型を採用し、かつ冷却空間に適合するコンパクトな構造設計を行った^[4]。Triplexer については、天体 (RF) 信号を常温前段 IF 系の帯域に適合させるため、2 つの導波管型 2 帯域分離器 (Diplexer) を直列接続する構成とし、これにより 3 帯域 (70 GHz 帯、80-90 GHz 帯、110 GHz 帯) の同時分離を実現した^[5]。

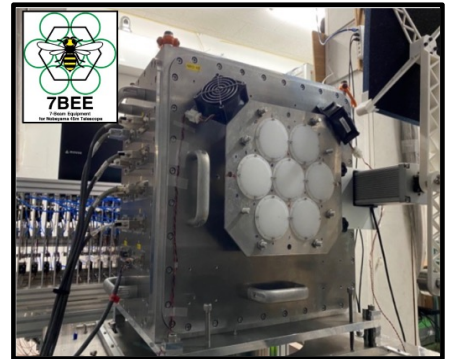


図 3 : 7BEE の外観

これらの設計により、7BEE では合計 42 系統の中間周波数 (IF) 出力を同時に得ることが可能となった。観測効率の観点では、70 GHz 帯においては T70 受信機と比較して約 7 倍、80-110 GHz 帯においては FOREST と比較して約 2 倍の観測効率向上を達成した。さらに、世界的に見ても 70 GHz 帯をカバーする受信機の中で、最高水準のマッピング能力を有する受信機となっている。

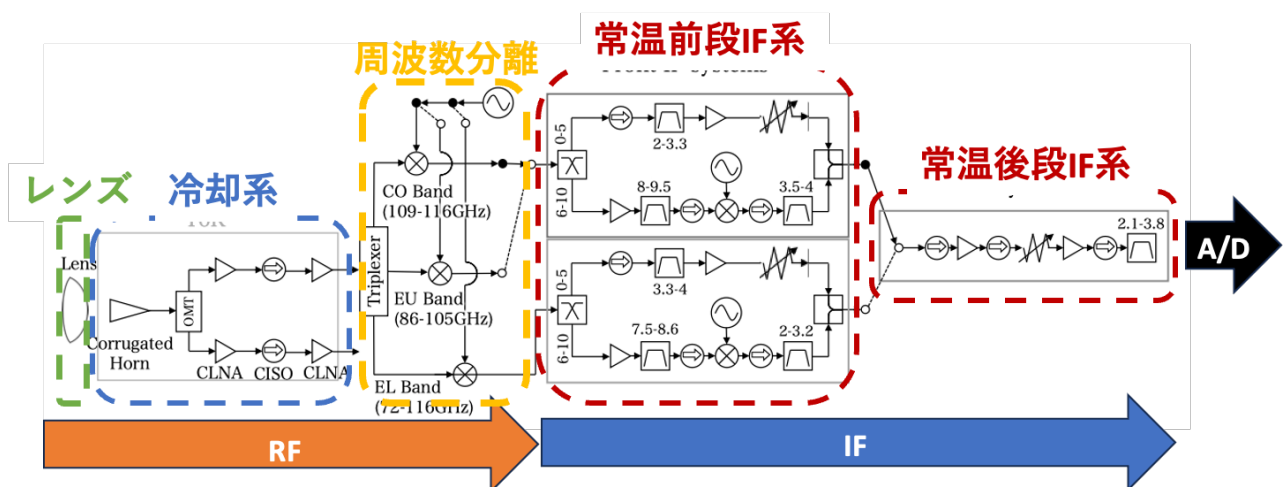


図 4 : 7BEE のブロック図。アンテナから届いた電波は、矢印の順に増幅・周波数分離・周波数変換を経て、サンプリングされ分光計に届く。

3. RF 窓の結露問題

7BEE は、2022 年から 2023 年にかけて実施した試験運用期間中に、42 系統の IF 出力のうち約 8 割でシステム雑音温度 (T_{sys}) の悪化および利得 (Gain) の低下が確認された。さらに、短期間での昇温・再冷却サイクルを行った際、受信機窓内側に結露が発生していることが判明した。これは、冷却系内部への水分流入が想定以上に大きいことを示しており、これらの症状から CLNA 自体の劣化が考えられた。そこでメーカーによる CLNA の分解調査を実施した結果、内部構造の腐食が確認され、全体の約 6 割の個体において故障が発生していることが明らかとなった。

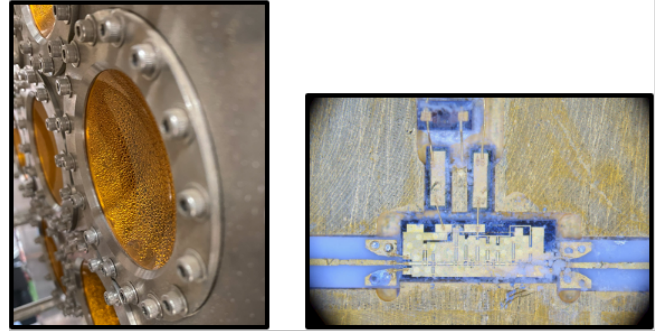


図 5：結露したカプトン窓と腐食したCLNA内部

本件の主な原因は、受信機窓材として採用していたカプトンの物性にあると考えられる。カプトンは電波透過性に優れ、耐圧性も高いため、薄膜化によって反射損失を低く抑えられる利点を有する。一方で、透湿性が高いという特性も併せ持つ。加えて、7BEE の総窓面積は FOREST と比較して約 5 倍と大きく、これにより冷却系への水分の総流入量が増大し、結果として CLNA の腐食および故障を引き起こしたものと推察される。この問題への対策として、我々は窓材をカプトン (厚さ 0.05 mm) から、透湿性が低く、過去の受信機において運用実績のあるテフロン (厚さ 0.8 mm) へと変更した。窓材変更後、約半年間にわたる冷却試験運用を実施した結果、デュワー内部での結露は一切確認されず、現在では全系統において T_{sys} および Gain は安定した状態を維持している。



図 6：結露のないテフロン窓

一方で、 T_{RX} を比較すると、テフロン窓採用後はカプトン窓に比べて約 20-40 K の悪化が見られた。これは、主に窓材における反射損失の増加に起因すると考えられる。ただし、この T_{RX} の増加は観測運用上致命的な影響を与えるものではなく、現時点では実用上問題は無い。今後は、次回のメンテナンスシーズンにおいて、テフロン窓の厚みの最適化と耐久実験を行い、反射損失の低減による T_{RX} 改善を図る予定である。

4.1. 2 輝線同時観測のための IF 調整

7BEE は約 40 GHz に及ぶ広い RF 帯域を有している一方で、使用する分光計の帯域は 2 GHz と比較的狭い。また、7BEE の主たる科学目標に関連する輝線の中には、周波数間隔が 2 GHz 以上離れているものが存在する。このため、離れた 2 輝線を同時に観測するための工夫が必要となる。そこで 7BEE では、常温前段 IF 系において IF 信号の「切り貼り」を行い、複数の周波数成分を 1 つの分光計帯域内に再構成する方式を採用している。ただし、IF 入力には CLNA の周波数特性が反映されているため、この特性を考慮せずに IF 出力の結合を行うと、サンプリングが適切に行われず一方の感度が著しく低下する

可能性がある。この問題を回避するため、IF 出力全体の周波数特性をできるだけ平坦になるよう、パワーレベルの調整を行う必要がある。7BEE では、各 IF 信号でこの調整を実施し、同時に T_{RX} が最小となる条件を探索・設定することで、同時観測時における性能の最適化を図った。

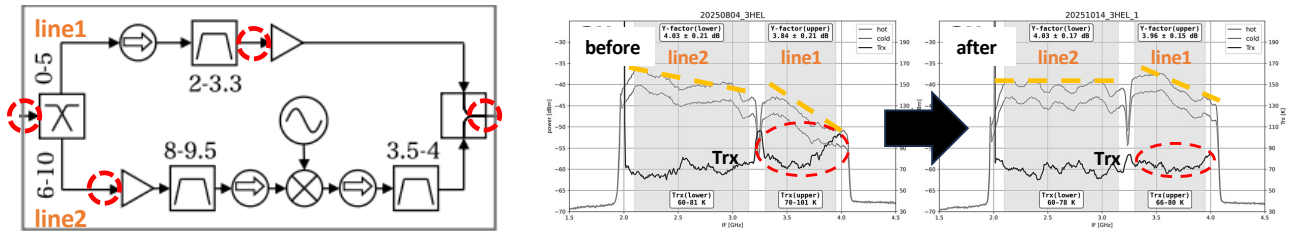


図 7：常温前段 IF 系の調整箇所と調整結果。IF 出力の upper 側と lower 側のレベルを揃えるため、ブロック図のうち赤丸箇所にてパワー調整を行った。

4.2. 前段常温 IF 系の改修

従来は予算上の制約から、80-90 GHz 帯と 110 GHz 帯の常温前段 IF 系を共通化していた。しかしながら、両帯域では CLNA の周波数特性が大きく異なるため、上述した同時観測に向けた細かなパワー調整を行うことが困難であった。そこで今回、常温前段 IF 系にプログラマブルアッテネータを新たに追加し、帯域ごとに独立した利得制御を可能とした。これにより、80-90 GHz 帯および 110 GHz 帯の双方において、IF 出力の周波数特性を最適化した状態での同時観測が実現可能となった。

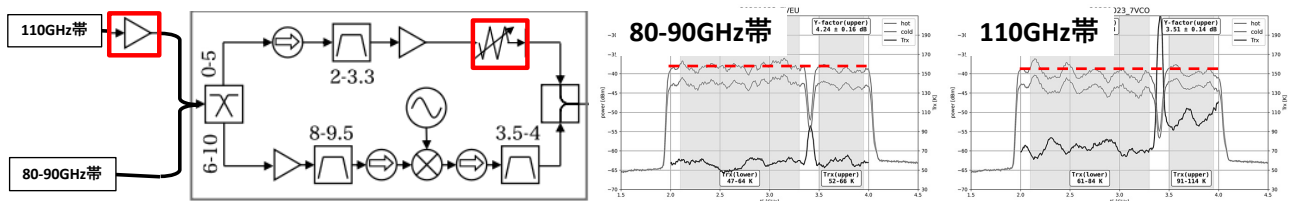


図 8：常温前段 IF 系の改修箇所及び改修結果。常温前段 IF 系は 80-90GHz 帯を基準に調整し、110GHz 帯に常温増幅器とプログラマブルアッテネータを追加した

5. 2025-2026 シーズン

これまでに述べた問題や改修を経て、2025-2026 シーズンには 70 GHz 帯の 14 系統の IF 調整が完了した。また、試験観測で用いる Si0 (86 GHz) 輝線の観測も可能な状態となった。調整が完了した帯域が限定的な理由は、RF 出力数が多く、冷却系背面に取り付けられた周波数分離の立体回路や IF 系は密集して煩雑なため、部品交換や IF 調整が容易ではないためである。

試験観測では、ビームパターン、受信機位置のズレ、および主ビーム能率の評価を行った。ビームパターンについては、測定されたビームサイズが設計

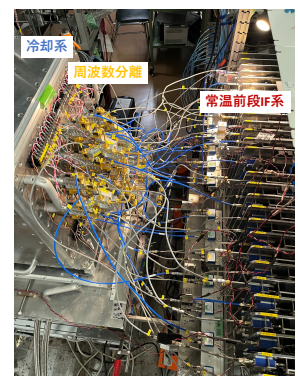


図 9：7BEEの背面

値と良く一致しており、サイドローブの影響も小さいことが確認された。一方で、特定のビーム位置が設計値と異なることが判明した。この点については、ホーンの組み付け方に問題がある可能性があり、次回のメンテナンスシーズンに詳細な確認を行う予定である。受信機位置のズレについては、中心ビームを基準として他のビームとの相対位置を評価した。その結果、すべてのビームにおいて位置ズレは概ね観測所が許容する 3 arcsec 以内に収まっていることが確認された。さらに、70 GHz 帯における主ビーム能率は 0.4 と測定された。この値は T70 と一致しており、7BEE が従来受信機と同等のビーム性能を有していることを示している。

以上の結果を踏まえ、2025-2026 シーズン後期より 70 GHz 帯の共同利用観測を開始した。

6. まとめ

我々のグループは広帯域マルチビーム受信機 7BEE を開発した。今年度は結露問題を克服し、性能向上に向けた改修を行い 70GHz 帯の調整が完了した。2025-2026 シーズンは限定的ではあるが共同利用を開始した。次のメンテナンス期には窓厚の最適化や 80-110GHz 帯の調整を済ませ、2026-2027 シーズンは全帯域の共同利用開始を目指す。

7. 参考文献

- [1] https://lownoisefactory.com/product/lnf-lnc65_115wb-2/
- [2] Gonzalez, A., Kaneko, K., Sakai, R., Kojima, T., & Uzawa, Y. 2020, Proc. SPIE, 11453, 114533S
- [3] Yamasaki, Y., Hasegawa, Y., Yoneyama, S., et al. 2023 PASJ, 75, 499
- [4] 米山 翔, 修士論文, 2023
- [5] 川下 紗奈, 2021 年秋季年会, V111b