

3D-CAD による JT-60SA 電子サイクロトロン加熱装置の

アンテナ及び伝送ラインの検討

○和田健次、小林貴之、諫山明彦、長谷川浩一、佐藤文明、横倉賢治、鈴木貞明、柴山実、平内慎一、下野貢、澤島正之、五十嵐浩一、寺門正之、日向淳、森山伸一

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット JT-60RF 開発グループ

1 はじめに

日本原子力研究開発機構では、約 20 年間核融合研究を推進してきた JT-60U トカマク装置を改修し、超伝導コイルを用いたサテライトトカマク装置(JT-60SA)を建設する計画である。この計画に伴い、プラズマにミリ波を入射して局所加熱／電流駆動を行い、閉じ込め性能を向上させるための電子サイクロトロン加熱(ECH)装置の設計を進めている。

ここでは、JT-60SA 計画に求められる ECH 装置の長パルス運転(系統あたり 1MW,100 秒間)を実現するために必要な、水冷式アンテナの設計、並びに高効率伝送ラインの周辺機器との物理的干渉を回避するレイアウト設計に関して、3D-CAD を用いて行った検討について報告する。

2 ECH 装置の概要

ECH 装置は大電力高周波(RF)を発生する 110GHz 大電力発振管(ジャイロトロン)及びジャイロトロン駆動用電源、周波数に対応した磁場を発生させるための超伝導コイル、ジャイロトロンより出力された RF を伝送に適したモードに変換する整合器、モード変換後の RF をアンテナまで導く伝送系導波管、導波管内を伝送された RF をプラズマに入射するアンテナ等から構成される。図 1 に ECH 装置システム構成図を示す。

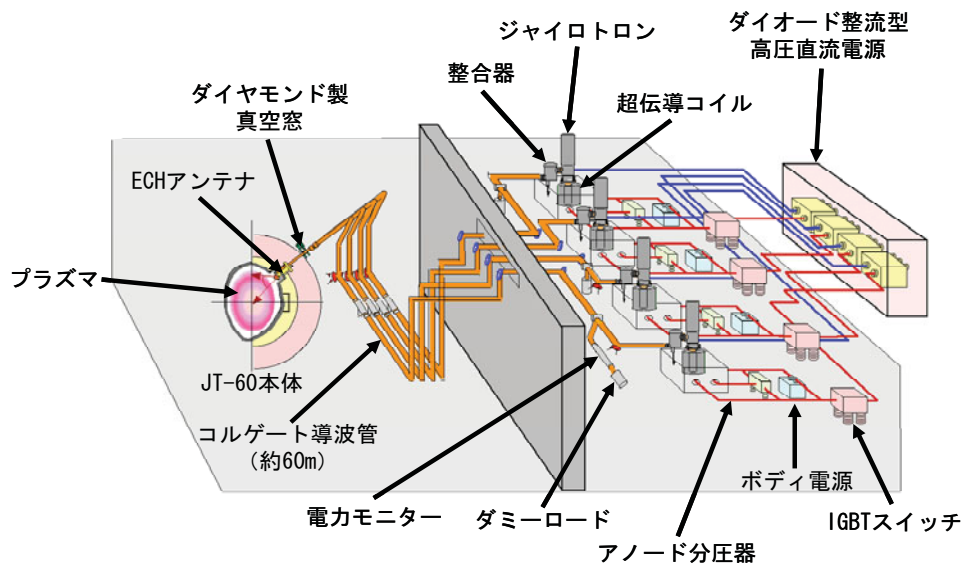


図 1. ECH 装置システム構成図

3 3D-CAD について

機器配置を設計検討する上で、機器同士の物理的な干渉を避けることは不可欠であり、直感的に形状を把握できる 3D モデル配置による干渉チェックは有効である。また、正確なモデリングが行われていれば、ソリッドモデルに含まれるデータを基に重量、重心、強度計算等を行うことが可能である等、多くのメリットがある。

一方、2D-CAD と比較し、多機能であるが故に習熟にある程度の期間を要する。講習会に参加し、その後は実務の中で徐々に操作を習得しているのが現状である。また、実用的な 3D モデルの描画や視点変更には一定以上のマシンスペックが要求されるため、初期費用が掛かる。複雑なモデルの場合、ファイルサイズも比較的大きくなるため、十分な保存領域の確保も必要である。

アンテナ及び伝送ラインの設計に使用する 3D-CAD アプリケーションとして、当初は VectorWorks を使用していたが、JT-60SA 計画全体の設計において、CATIA を採用したことに伴い、初期の VectorWorks で作成したモデルを CATIA 化する作業を現在行っている。新規のモデルに関しては CATIA を用いた作図に移行している。

4 JT-60SA 用 ECH アンテナ

ECH アンテナは、内部を高真空に保たれた RF 伝送系機器により導かれた RF を、任意の角度でプラズマに入射するためのものであり、冷却水系、可動ミラー、固定ミラー、ミラー駆動機構、入射系導波管等で構成される。このうち冷却水系統は、JT-60SA で求められる 100 秒間の長パルス入射に伴う熱負荷に対応するためのものであり、今回新たに設計した部分の一つである。図 2 に ECH アンテナ構成図を示す。

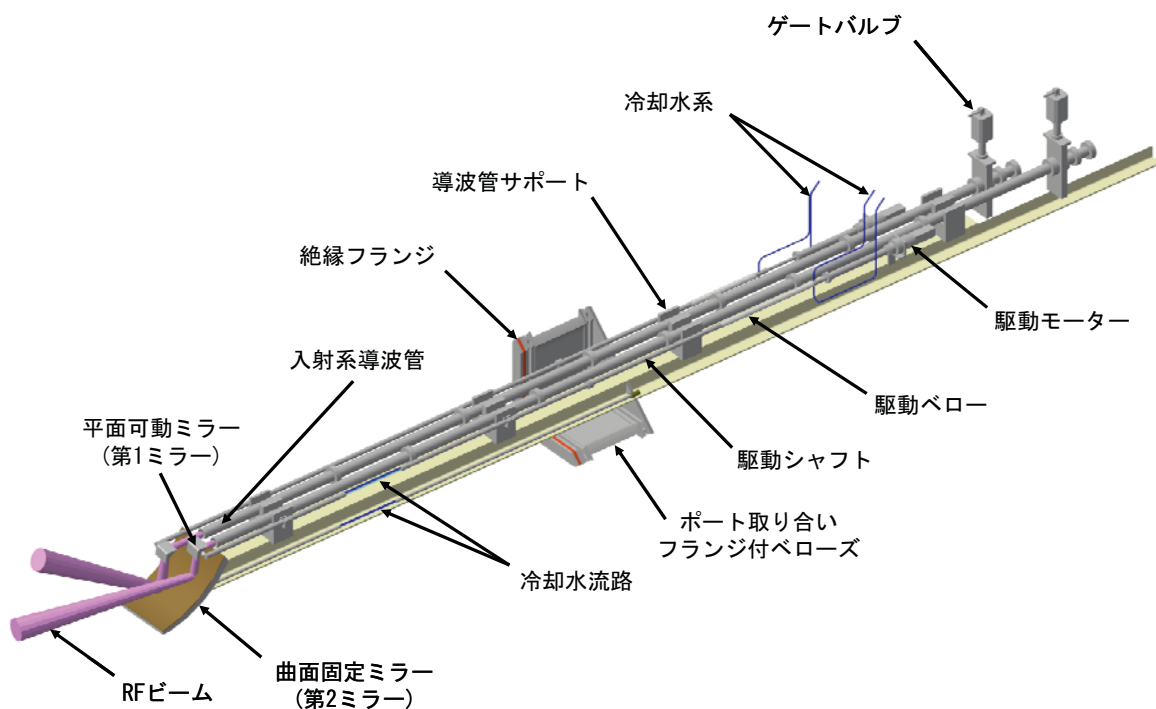


図 2. ECH アンテナ構成図

現在設計中のアンテナ先端部には RF 入射角度を制御するための金属ミラーが 1 対設けられており、平面鏡(第 1 ミラー)と曲面鏡(第 2 ミラー)からなる。従来型のアンテナは第 1 ミラーに曲面鏡、第 2 ミラーに平面鏡を採用しているため組み合わせ方が逆となっている。母材は SUS 製で鏡面には RF の抵抗損失が小さく、

熱伝導率の高い銅を採用する計画である。アンテナが据え付けられる領域は、プラズマを閉じ込めるために発生させる強い磁場にさらされており、各部品材料には非磁性体を用いる必要がある。図3にアンテナ先端部を示す。

第一ミラーは導波管中心線上、前後方向への直線駆動と、駆動シャフトの中心を回転軸とし、上下方向への回転駆動を可能にする設計となっており、導波管から入射されたRFを反射し、第2ミラーの最適な位置へ入射する役割を担う。回転駆動に関しては、従来型のアンテナでも採用されているが、ミラーの回転軸を入射系導波管中心としている点が異なる。駆動シャフト後部のベローズを伸縮させることで直線駆動を可能にする構造であり、RF入射角度制御に十分なストロークの確保とベローズ部の強度を考慮した設計が必要である。また、ミラーの直線駆動は従来型のアンテナには無い駆動方式であるが、駆動シャフト内をミラーへの冷却水流路とし、シャフト全体を駆動させることで、冷却水の取り合い箇所を選ばない設計となっている。これにより、大気側に冷却水取り合いポートを設けることができ、真空中での漏水を避けることができるのが今回新設計したアンテナの大きな特徴であり、最大の利点である。

第2ミラーは第1ミラー位置との組み合わせにより、RFのプラズマへの入射角度を変化させるために、鏡面に曲率をもたせる設計をしている。従来型のアンテナでは、第2ミラーに、平面鏡で垂直方向に回転駆動するタイプを採用していたが、JT-60SAでは、ミラーの冷却が必要であり、回転駆動ミラーを水冷するためには、屈曲性を持った冷却水流路をミラー近傍の真空雰囲気中に設けなければならない。その場合、冷却チューブの劣化により真空容器内へ漏水する危険性が高まるので、JT-60SAで使用する第2ミラーには、駆動機構を持たない固定ミラーを採用する計画である。図4に従来型アンテナ先端部を示す。

ポート取り合いフランジ付ベローズよりアンテナ先端側は据え付け時、アンテナ底面に取り付けられたレールをガイドにしポートに挿入するため、ポート内径である480mmの範囲に全てのアンテナ構造物を収める必要があり、先端部はコンパクトに設計する必要があった。図5にアンテナポート挿入図を示す。

JT-60SAの設計においては、据付時20℃、運転時50℃、ベーキング時200℃の環境を想定しており、ポート昇温時の熱膨張による、ポート内有効利用領域の縮小を考慮した設計寸法の微調整が必要である。本体側とアンテナ側の物理的接

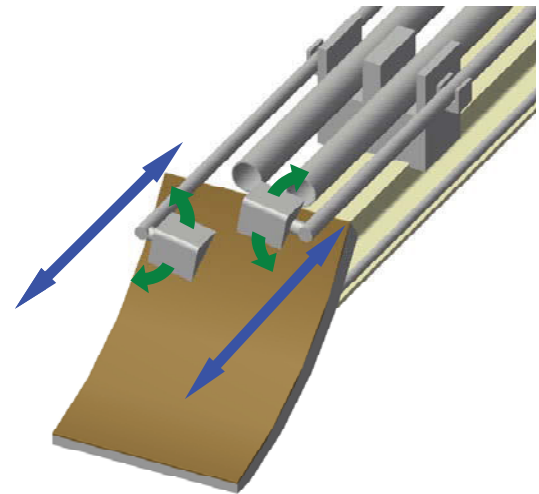


図3. アンテナ先端部

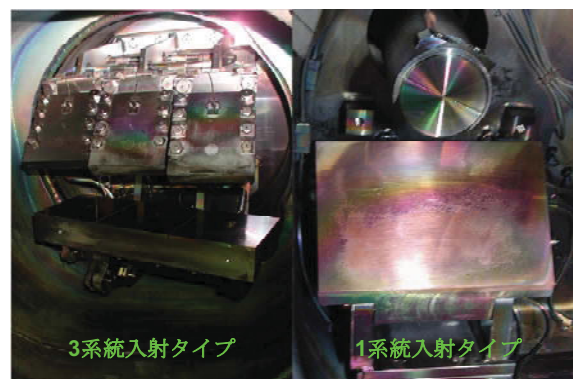


図4. 従来型アンテナ先端部

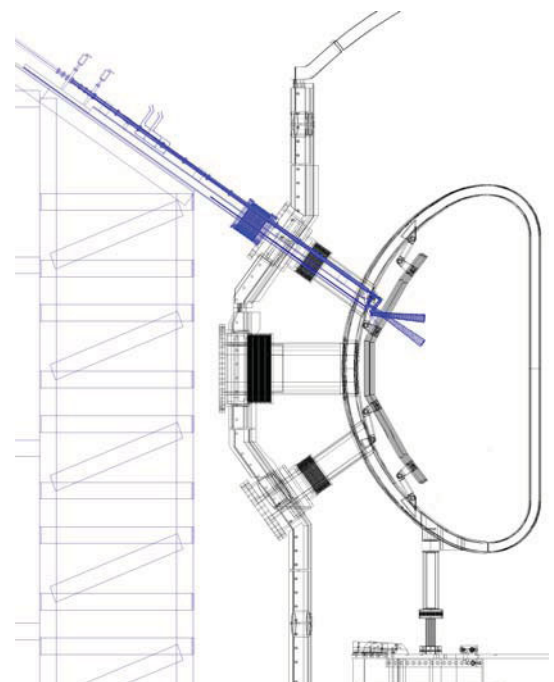


図5. アンテナポート挿入図

点はフランジ付ベローズ部のみであり、地震発生時、両者の揺れ方が異なるため、空間的な余裕をとる必要がある。また、JT-60SA では、超伝導コイル冷却用の配管や多くの計測器が計画されており、ポート外の部分についてもそれら設備との物理的干渉を避けた設計が求められる。これらの空間的制限のある中でより高性能なアンテナを設計することが目標となる。

これまで新型アンテナ構成部品間の物理的な整合性やミラー駆動機構の成立性を、3D-CAD の長所を活かしてチェックしモデリングを行ってきた。今後は詳細な機械寸法の決定、各種解析結果に伴うモデル形状の変更等を柔軟に CAD モデルに反映したい。

5 伝送系導波管敷設ルート

ジャイロトロンからアンテナまで RF を伝送するための経路を伝送系という。伝送系は導波管と呼ばれる外径 76.2mm、内径 60.325mm のステンレスまたはアルミ製の管をカプラで連結し構成されている。断面形状には円型のものを採用している。図 6 に ECH 導波管及びカプラを示す。

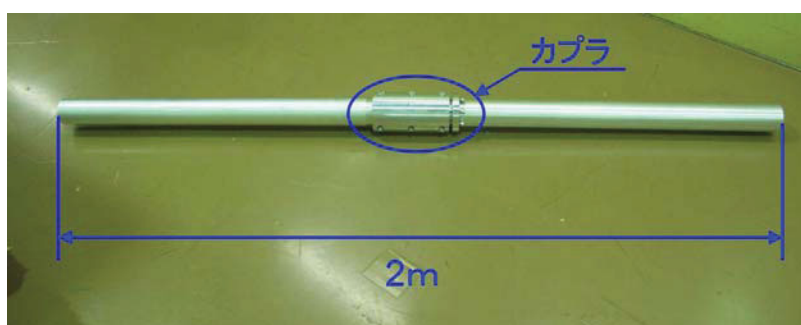


図 6. ECH 導波管及びカプラ

導波管敷設ルート上においては、物理的な干渉を避けることは勿論であるが、曲げ部を可能な限り少なくし、RF 損失を抑えることが重要となる。曲げ部には 90 度バンドを使用しており、曲げ部を一箇所増やすとおよそ 1%RF 損失が増える。現在検討中の伝送ラインで最もバンド使用数の多い系統は 1 系統あたり 5 個である。図 7 に設計開始当初の導波管敷設ルート、図 8 に設計改良後の導波管敷設ルートを示す。

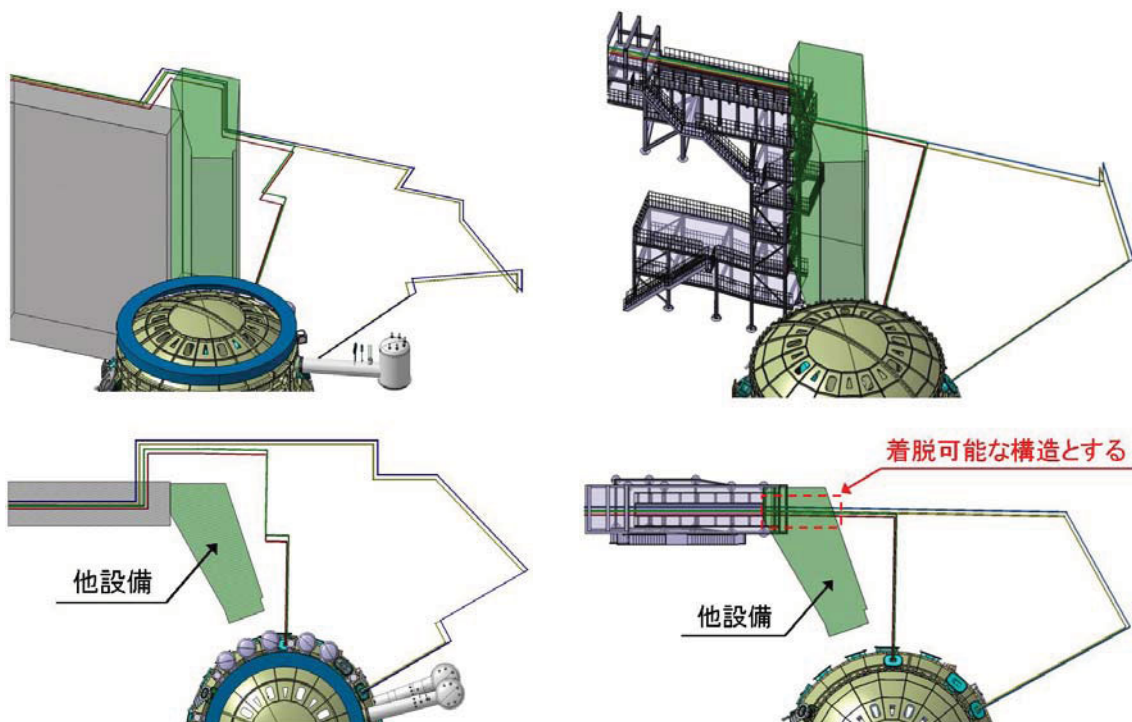


図 7. 設計開始当初の導波管敷設ルート

図 8. 設計改良後の導波管敷設ルート

設計初期段階では、他設備との干渉を避けることに重点を置いたルートを検討していたが、他設備と導波管敷設ラインが、年 1 回以下程度 of 他設備メンテナンス時にのみ干渉することが分かったため、ベンドを減らし、RF 損失を軽減する方針に変更した。それに伴い、他設備メンテナンススペースを確保し、物理的干渉を回避することになるが、該当部に使用する導波管の長さを適宜調整し、導波管直下に据え付けられる点検歩廊を着脱可能な構造とすることで対応する計画である。図 9 に JT-60SA 本体室内機器配置(2009 年 12 月 24 日現在)を示す。

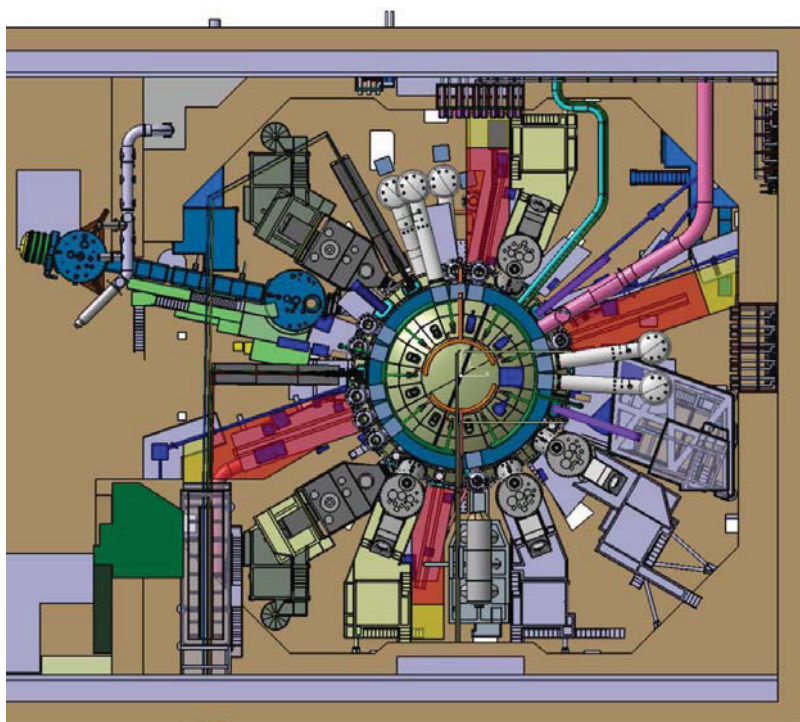


図 9. JT-60SA 本体室内機器配置(2009 年 12 月 24 日現在)

アンテナの据え付け角度は、JT-60SA 本体真空容器中心の水平面に対して 35.5 度であるが、特殊な(高価な)ベンドを用いない限り直角以外の方向に曲げることはできない。そのため、アンテナ入射系導波管と伝送系導波管との接続部は、他設備との物理的干渉を回避したルートを実現する場合、ベンドで直角に取り合うことができる位置が限られてくる。そこで、設計初期段階で接続点の座標を決定し、伝送系レイアウトの基準とすることにより、設計の円滑化を図った。図 10 に 90 度ベンドを示す。

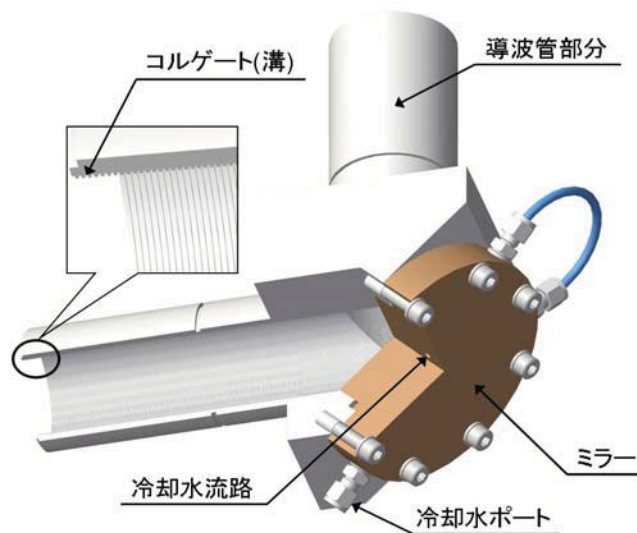


図 10. 90 度ベンド(手前 1/4 をカットして内部を表示)

伝送系の物理的干渉を回避するために 90 度以外の角度に導波管を敷設する場合、一度垂直方向に曲げ、ベンドの回転により角度を調整する。この場合、垂直方向への曲げと角度調整用のベンドが 2 個増加してしまうため、RF 損失は増加する。理想的な条件下での我々が採用するモード(HE₁₁ モード)伝送の場合、直線的な導波管伝送における導波管での抵抗損失による RF 損失が 100m あたりおよそ 0.2% であるため、ベンド 2 個

の増加に伴う RF 損失は導波管敷設距離 1km 分に相当する。現在検討中の伝送系は敷設距離が最も長い系統でおおよそ 53m を見込んでいるため、ベンドを無視した場合の損失はおおよそ 0.1% である。

このように、ベンドによる RF 損失は大きく、低損失な伝送を行うためにはベンドの数を最小限に抑えることが非常に重要であるため、ルート検討時に重視した。また、低損失な伝送系を設計することに関しては伝送ラインの長距離化に伴う RF 損失は無視できる程度であるが、導波管購入や敷設に掛かるコスト、真空排気ボリューム、メンテナンス性等を考慮すると、敷設距離は可能な限り短い方が良いため、伝送ラインの短縮化に関しても設計時に考慮した。

高性能・低コストを両立し、敷設時の作業性を考慮した伝送系導波管敷設ルートを検討することが当面の目標である。

6 まとめ

JT-60SA で使用するアンテナでは従来のアンテナの設計を軸に、ミラーを水冷可能な構造とし、アンテナ後部に設けたベローズの伸縮によりシャフトを水平方向に前後させることで第一ミラーの直線駆動を可能にしている。また、駆動シャフト内に第一ミラーの冷却水流路を設けることで、大気側で冷却水を取り合えることが、新型アンテナ設計において特筆すべき点である。

回転駆動機構に関しては、現在設計初期段階にあり、細部の機械寸法を検討しているところであるため、本発表では図示していないが、設計は順調に進捗している。

アンテナを支持するための架台に関しては、周辺他設備の 3D モデルを配置し、物理的な干渉の無い配置を検討すると共に、ソリッドデータを利用した強度計算を行う計画である。

伝送ラインに関しては、現状の設計からのレイアウト変更の必要はないと考えるが、他設備に仕様変更等が生じ、伝送ラインと物理的に干渉する場合、他設備側と打ち合わせを行い、ルートを迂回するなど柔軟に対応する必要がある。敷設作業時には足場が必要になり、日常的な点検も行うこととなるため、最低でも人が歩くことができる幅の歩廊を伝送ライン直下に設計する必要がある。また、導波管組み付け精度が性能に大きく影響を及ぼすため、特に高さ方向に関しては接続部が作業しやすい位置となるよう配慮したい。

今回 3D-CAD を使用したモデリングを行ったことで、機器全体の形状を直感的にイメージできたため、形状を変更した場合でも、変更前後のモデルの比較が容易であり、3D-CAD の利便性の高さを活かすことができた。また、物理的干渉のチェックに関しては、JT-60SA には多くの機器がインストールされる計画であるため、3D-CAD を用いなければ設計検討が非常に困難なものとなる。安全で高性能な装置を、良好な作業性とメンテナンス性を確保しつつ低コストで製作することを意識し、今後も設計検討に取り組んでいきたい。