

Belle II 実験 LS2 に向けた新型 RVC の設計開発

○金山 高大^{A)}、高力 孝^{A)}、鈴木 純一^{A)}、田中 秀治^{A)}、中村 克朗^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(以下 KEK)で行われている SuperKEKB/Belle II 実験では、ビーム衝突点用超伝導電磁石(QCS)と衝突点ビームパイプとの接続に、遠隔真空接続(RVC)と呼ばれる方法が使われている。しかし、今後予定されているルミノシティ向上を目的とする長期シャットダウン(LS2)に向けたアップグレード案では、スペースの都合から現在の RVC が使えなくなる可能性が高い。そのため、新型 RVC の検討を開始した。新型 RVC では、現在の RVC と比べて、衝突点側に集約されたメカ機構が省略でき、先端部直径が 1/2 以下となる。本発表では、新型 RVC の設計開発について進捗報告する。

2. 設計開発

2.1 概念設計と開発状況

現在の RVC では、回転式ロックシリンダーで噛み合わせたビームパイプの接続部に、窒素ガスで圧力をかけて真空を維持する方法^{[1][2]}なのに対して、新型 RVC では、ボルトの締結力で真空接続を行うシンプルなコンセプトで設計を開始した。図 1 に新型 RVC の概念図を示す。

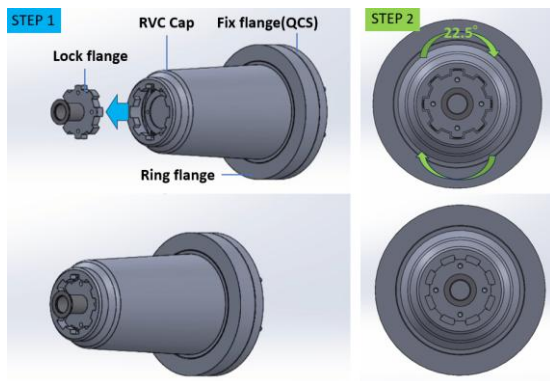


図 1 新型 RVC 概念図

衝突点ビームパイプ接続部の歯車型フランジ(Lock flange)へ、QCS と一体となった RVC 構造体(RVC Cap)を挿入し、22.5° 回転させることで爪を歯車型フランジに引っ掛けて噛み合わせ、遠隔操作ロッドでボルトを締結して真空接続する構想である。

開発状況として、既にグループで検討されていた上記の構造案に対して、実現可能か構造解析を行い、モックアップ製作及び試験を進めている状況である。

2.2 基本設計と構造解析

真空接続を実現するためには、接続部に搭載したメタルシールに対して、つぶれるために必要な荷重を RVC でかける必要がある。今回、メタルシールはヘリコフレックスシールの HNV タイプを使う予定である。締付時の必要ボルト荷重 F_j は、直径 D_j と設計締付圧力 Y_2 、係数をかけて下記のように求まる。

$$F_j = \pi * D_j * Y_2 * 1.1 \quad (1)$$

(1)式より必要ボルト荷重を求めると、直径の大きいものを 1 つ使う案では、 $F_j \approx 27000 \text{ N}$ 、直径の小さいものを 2 つ使う案では、 $F_j \approx 18000 \text{ N}$ となった。

ボルトの締結に加えて、荷重に余裕を持つために、少ない撓み量で高荷重を得ることが出来る皿バネを使用する事にした。皿バネのばね定数 k は非線形だが、荷重 P と撓み量 δ から下記のように求まる。

$$k = \frac{dP}{d\delta} \quad (2)$$

(2)式より使用予定の皿バネでばね定数を求めると、 $k=3.8 \text{ kN/mm}$ となった。1 枚辺りの撓み量は推奨値の 75 %までとすると 0.3375 mm 、4 枚重ねで 4 段重ねると 1.35 mm 、これを 8 箇所を使用する場合、皿バネでかけられる荷重は $3800 * 1.35 * 8 \approx 41000 \text{ N}$ 程度、データシートのばね力から計算すると、1 枚当たり $1520 \text{ N} * 4 \text{ 枚} * 8 \text{ 箇所} \approx 48600 \text{ N}$ 、従って、 $41000 \sim 48600 \text{ N}$ 程度の荷重をかけることができる。

上記の案に対して、実現可能かシミュレーションソフトウェア ANSYS での構造解析を行った。図 2 に解析の様子を示す。

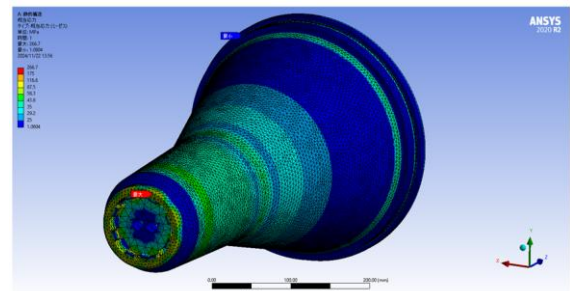


図 2 構造解析の様子

荷重 48000 N の条件で応力集中が起こらないように設計変更と解析を重ね、安全率 1.5 に収まるよう設計し、モックアップを製作することにした。

3. RVC 簡易モックアップによる原理実証 (2024 年度)

3.1 簡易モックアップによる真空接続試験

2024 年度、まずは接続部周辺を抜粋した簡易的なモックアップを製作することにした。このモックアップでは、遠隔操作の機能はまだないが、メタルシールをボルトの締結力で密着させて皿バネで荷重に余裕を持ち、真空接続を行う原理実証を目的とした。図 3 に新型 RVC 簡易モックアップの概要を示す。

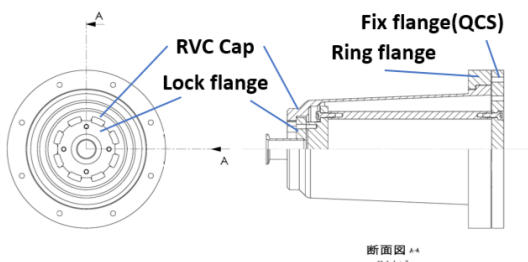


図 3 RVC 簡易モックアップ半断面図

試験手順としては、QCS を模擬した固定端にメタルシールを取り付け、歯車型の Lock flange を位置決めボルトで仮固定した。その後、円筒形の RVC Cap を回転させて Lock flange の歯車部に爪を噛み合わせた。後方では Ring flange で RVC Cap を押さえて皿バネを 75%位置まで 8 箇所のボルトを 90° ずつ締結することで規定の荷重をかけて、メタルシールを密着させ、真空接続を行う。図 4 に試験の様子を示す。

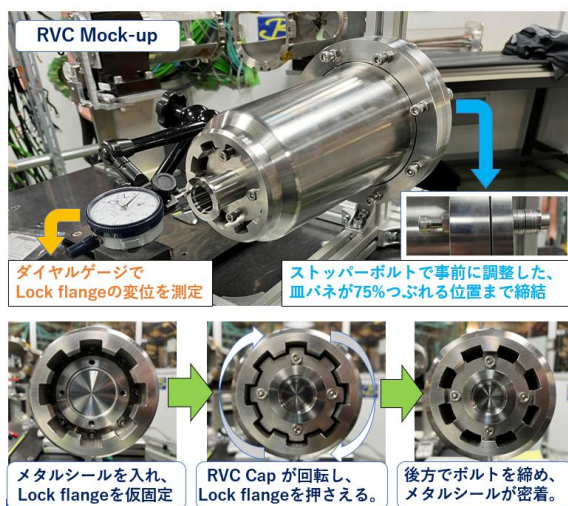


図 4 RVC 簡易モックアップ試験の様子

また、Lock flange が密着するまでの変位量はダイヤルゲージで測定した。図 5 にその際の変位量を示す。図のように、ボルトが 2.75 回転から 3 回転に回した際、変位の値が変わらず平行に推移しているのが分かる。これは、メタルシール密着し、皿バネに

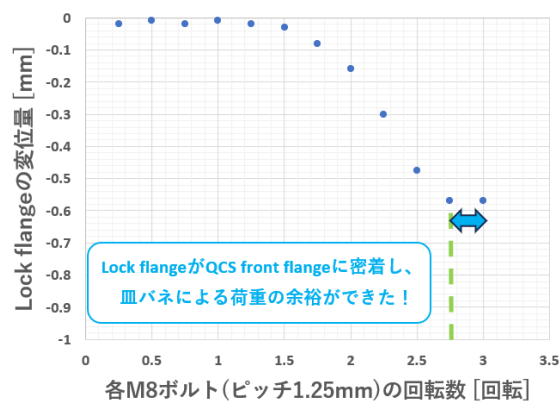


図 5 皿バネによる荷重の余裕

より、荷重の余裕を持つことができた証拠である。(荷重の余裕としては、 3800N/mm (ばね定数) * 0.3125 (M8 並目ねじのピッチ $1.25\text{mm} \times 1/4$ 周) * 8 箇所 = 9500N 程度である。)

3.2 ヘリウムリーク試験 (2024 年度)

上記試験の後、真空接続が本当に成功しているか、ヘリウムリーク試験を行った。図 6 に試験の様子を示す。



図 6 ヘリウムリーク試験の様子

ヘリウムリークディテクタには Adixen ASM 142 を使用した。試験手順としては、メタルシールをつぶした Lock flange の接続箇所にヘリウムを吹き付けてから密封して数分待ち、リーク量を確認した。途中、継ぎ手部分からリークしていることが判明し、袋で覆った。

試験の結果、 $1.4 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ オーダーの結果が得られ、ボルト締めで真空接続を行う原理実証に成功した。

次は実際の大きさと遠隔操作機構も含めた試験を行うことや、先端部構造の具体化などが課題となり、2025 年度にフルサイズのモックアップを製作する方針となった。

4. RVC フルサイズモックアップ(2025 年度)

4.1 フルサイズモックアップによる真空接続試験

2025 年度、新型 RVC のフルサイズモックアップを製作した。このモックアップでは、実際の大きさ且つ接続部の部品をより本番に近づけて製作し、遠隔操作機構も後から取り付けることを想定している。また、2024 年度のモックアップでは 1 つだったメタルシールも、ビームパイプの数に合わせ 2 つとなり、より正確さが求められる。図 7 にフルサイズモックアップの概要を示す。

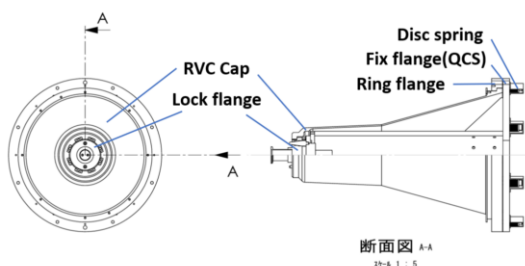


図 7 RVC フルサイズモックアップ半断面図

今回、全長約 500 mm で厚み約 3mm の RVC Cap を製作するにあたり、2024 年度で使用した RVC Cap を切断して後方部分と溶接することで、製作した。また、2024 年度と大きく違う点として、ビームパイプを模擬した構造、RVC Cap の回転機構、Lock flange と RVC の隙間を調整するための、皿バネとボルトのブラケット構造等である。

今回、全体を組み立てると重さが 4~50kg と重たく、たわみの影響を受けることなどを考え、段階的に試験を行う事にした。まずは縦置きの手動でボルトを締結するシンプルなセットアップで試験を行い、成功したら横置きにして遠隔操作ロッドを加えて再度試験を行う方針となった。図 8 に縦置きでの試験の様子を示す。

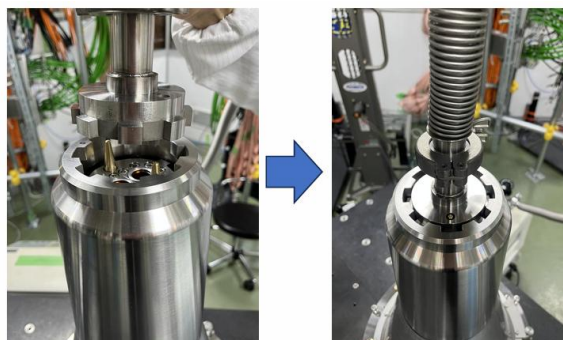


図 8 フルサイズモックアップ真空接続試験

また、メタルシールのつぶれしろは設計値で 0.7 mm であるが、つぶす際に RVC Cap と QCS 固定端の変位をダイヤルゲージで測定することで、実際につぶれていることを確かめた。図 9 にその時の様子を示す。

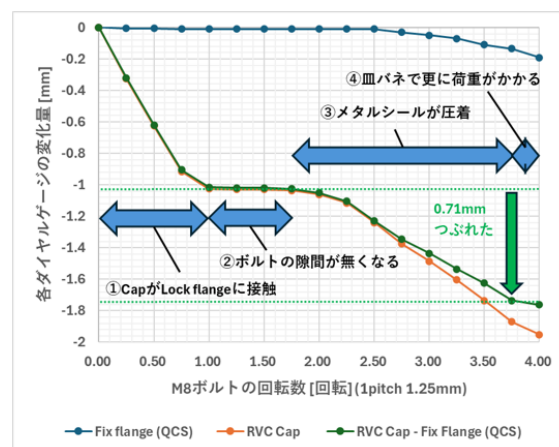


図 9 メタルシールがつぶれる様子

本来であれば動かないはずの固定端 (Fix flange) も変形していることが分かり、RVC Cap との差を取ることで、実際につぶれ量を求めた。すると、約 0.71 mm つぶれており、設計値と合うことを確かめた。

4.2 ヘリウムリーク試験(2025 年度)

ヘリウムリーク試験では、継ぎ手部分には空気を流すことで気密を保ち、RVC の接続部へヘリウムを吹き付けた。図 10 に試験時の様子を示す。



図 10 ヘリウムリーク試験の様子

結果、リークレート $5.0 \times 10^{-13} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ からヘリウムを吹き付けて 10 分間 $10^{-13} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ オーダーを維持することができた。これは、加速器でも十分使えるとても良い結果となり、まずは縦置き状態でのフルサイズモックアップ試験に成功した。

4.3 今後の開発予定

今回、縦置きでの真空接続試験に成功したので、次のステップとしては横置きで遠隔操作ロッドにより同様の試験を行う予定である。図 11 に横置きにしたフルサイズモックアップと遠隔操作機構を示す。



図 11 遠隔操作試験に向けて

現在、遠隔操作機構には、ボルトを遠隔で操作するロッドを 1 箇所のみ取り付けられている。規定のトルクをかけてボルトを締結することに成功したため、部品を発注し、ロッドの追加製作を予定している状況である。準備が整い次第、横置きでの試験を行う。

また、今後の開発項目としては、2 つのメタルシールを直径の異なるものにした際の試験、ケーブルを通すために RVC Cap を削った際の構造解析、などを行う予定である。

また、昨今 SBL(Sudden Beam Loss)が問題となっているが、現 RVC で使用された真空用接着剤もその要因の 1 つという可能性が考えられている。そのため、接着剤を使わずにメタルシールを平行に保持したまま真空接続を行うことが理想であり、そのための試験も予定している。

5. まとめ・展望

LS2 に必要となる、新型 RVC の設計開発を始め、2024 年度は簡易モックアップの製作し、原理実証を行った。2025 年度にはフルサイズモックアップを製作し、まずは縦置き状態で真空接続試験を行った。ヘリウムリーク試験の結果、加速器でも使える結果が得られた。

今後は新型 RVC を実際の実験時と同じ横置き状態で遠隔操作ロッドを用いて上記と同様の真空接続試験を行い、本番に向けて改良を重ねていく予定である。

6. 謝辞

RVC のモックアップを設計開発するにあたり、多くのアドバイスをくださった Belle 関係者の皆様、部品の製作をしてくださった KEK 機械工学センターをはじめとする担当者の皆様に感謝したい。

参考文献

- [1] RVC operation manual forward v1.0 K.Gadow
27.08.2019
- [2] RVC operation manual backward v1.0 K.Gadow
27.08.2019