

■談話室

CERN 技術派遣研修：ANSYS を用いたメカニカルエンジニアリング

KEK 素粒子原子核研究所

亀井 直矢

naoya.kamei@kek.jp

2023 年（令和五年）5 月 10 日

1 はじめに

2022 年 3 月から 2023 年 2 月までの約 1 年間に亘り、CERN 技術派遣研修と呼ばれる ATLAS 実験参加機関の技術職員を対象とした CERN での技術研修制度に参加した。

私の配属先は、STI (Sources, Targets and Interactions Group) 部門の TCD (Targets, Collimators and Dumps) グループである。TCD は CERN が保有する加速器施設のビーム標的、コリメータ、ダンプを開発・運用・保守する役割を担っており、約 40 名が働いていた。そのうち CERN の正規スタッフは 2-3 割程度しかおらず、残りは大半が 20-30 代のフェローや Ph.D の学生等であり、若い人が多い印象を受けた。

TCD で私が行ったエンジニアリング業務は二つに大別できる。一つ目は、大強度ビームに耐えられるようなビーム窓（大気空間とビームが通過する真空配管とを隔てる仕切り板）を開発するための SMAUG (Study of beryllium MAterials Under vacuum & Glassy carbon) 試験に係る熱・構造解析である。もう一つは CERN の加速器設備である SPS (The Super Proton Synchrotron) リングと North Area を結ぶ TT-20 line 上に位置する TED (Target External Dump) の次世代版の設計解析である。本記事では、この二つの内容について紹介する。

2 SMAUG 試験に係る熱・構造解析

CERN での一つ目の業務として SMAUG 試験に係る熱・構造解析について説明する。SMAUG 試験とは、CERN の HiRadMat (High-Radiation to Materials) 施設を用いたビーム照射試験中に生じた厚さ 0.254 mm のベリリウム (Be) 製ビーム窓の破損トラブルに端を発した、次世代ビーム窓選定のための試験である。HiRadMat とは大強度陽子ビームを試験材料に照射する試験施設である。材料が高温になることで発生する熱応力が弾性変形の領域から降伏強度を超えると、塑性変形が始まってひずみが残る。従来の Be 製のビーム窓では昨今のビーム大強度化の要求に耐えられず、ビーム通過点が高温になることで塑性変形が生じ、照射を繰り返すとひずみの蓄積により破損に至ることが明らかになった。そこで、今後の大強度ビームに耐えられるビーム窓の開発が

急務であり、SMAUG 試験により、候補となるビーム窓に大強度陽子ビームを照射することでその耐久性を実験的に評価する。試験を実施するに際し、候補ビーム窓のビーム照射に対する耐久性評価のために、熱・構造解析を実施した。

2.1 SMAUG 試験装置

SMAUG 試験装置の 3D モデルを図 1 に示す。SMAUG 試験装置は、両端にフランジを有する配管 7 個を連ねるようにして構成される。プロジェクト開始当初の配管内レイアウト案（図 2）のように、配管は真空と大気圧が順番に隣り合うように構成されている。フランジ間にはビーム窓が仕切り板として合計 8 枚存在し、実機窓にかかる真空と大気圧との差圧を模擬している。この差圧環境下で、ビーム照射により発生する最高温度と熱応力にビーム窓が耐えることを確認することが本試験の目的である。プロジェクト開始当初に検討されていたビーム窓の構成案を表 1 に示す。

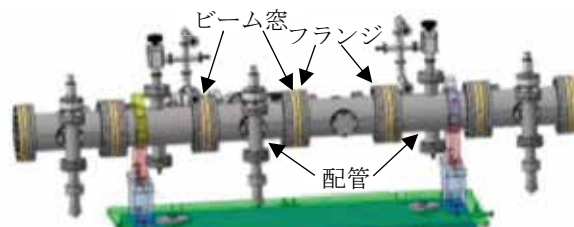


図 1. SMAUG 試験装置の 3D モデル[1]

(図は配管 6 個だが実機は 7 個)

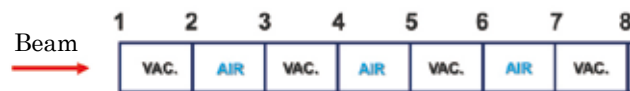


図 2. プロジェクト開始当初の配管内の空間の構成案[1]

表 1. 開始当初のビーム窓構成案

No.	Material	Composition	Thickness [mm]
1	Glassy Carbon	Pure Carbon	2
2	Glassy Carbon	Pure Carbon	2
3	PF-60	Pure Be	3
4	PF-60	Pure Be	0.254
5	S-200-FH	Pure Be	3
6	AlBeMet	38% Al + 62% Be	3
7	I-220-H	Pure Be	3
8	Glassy Carbon	Pure Carbon	2

ここで、Glassy Carbon (ガラス状炭素) は高強度、高耐熱性を誇りながら低密度であるためビームによる発熱量を抑えられることから、ビーム窓の候補材として最も有望視されている。PF-60 はこれまでビーム窓として使われていた純度の高い Be である。なお、破損したビーム窓の厚みは 0.254 mm であり、ベンチマークとしてこれを採用するとともに、厚みを増した 3 mm のビーム窓も選定された。S-200-FH と I-220-H は強度や伸びを向上させた Be 材である。AlBeMet は Al と Be の合金であり、Be より密度が大きいためビームによる発熱量は増えるが、伸びが大きく、またヤング率が小さいため発生熱応力が小さいという利点がある。表 1 にて、番号が小さいものほどビームラインの上流側に位置する。試験装置は奥行きが 2 m 程度あり、下流に行くに従ってビームは絞られていくので、下流に位置するビーム窓ほど過酷な照射環境に置かれる。

2.2 解析条件

本解析の解析評価フローを図 3 に示す。

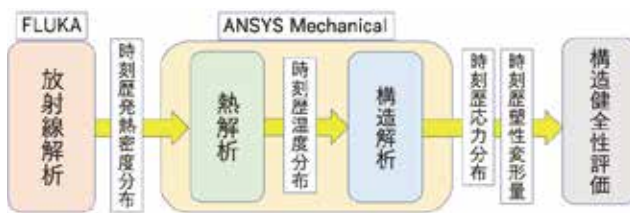


図 3. 解析評価フロー

はじめに、放射線解析コード FLUKA[2]により、各ビーム窓でのビームエネルギーロス、即ち発熱密度分布を求める。次に、FLUKA で得られた発熱密度分布を有限要素法解析ソフト ANSYS[3]にインプットとして与えることで、熱解析を実施する。最後に、得られた温度分布の時刻歴データを用いて、ANSYS にて構造解析を行い、熱応力による塑性変形の有無を確認することで構造健全性を評価する。CERN では FLUKA Button と呼ばれる ANSYS 専用のプラグインコードを独自開発しており、これを用いれば FLUKA のアウトプットファイルを未加工のまま ANSYS に紐づけてインプットとして導入できるため非常に便利だった。FLUKA による解析は FLUKA の開発や解析を専門とするグループに依頼し、私は ANSYS を用いた熱・構造解析を担当した。

ビーム窓に照射する陽子ビームのビーム条件は、ビーム軸上の焦点位置での標準偏差 σ と Intensity をパラメータとして以下の 3 ケースを選定し、解析を実施した。

- ケース 1 : $\sigma = 0.50$ mm , Intensity = 4.32×10^{13} ppp *
- ケース 2 : $\sigma = 0.35$ mm , Intensity = 3.46×10^{13} ppp *
- ケース 3 : $\sigma = 0.25$ mm , Intensity = 3.46×10^{13} ppp *

* ppp (protons per pulse) : 1 パルス当たりの陽子数

ケース番号が増加するに従って照射試験の過酷度は上がる。各ケースについて、パルス長が 7.2 μ s、パルス周期が 37.2 s のビームを 5 発打ち込むまでの時系列解析を実施した。

2.3 解析結果

ここでは、中強度条件の Case 2 の結果のみを表 2 に示す。

表 2. Case 2 での熱・構造解析結果

No.	Material	Max.	Max. Von	Max. Plastic		Convergence
		Temp [°C]	Mises [Mpa]	at 7.2 μ s	at last	
1	Glassy Carbon	954	57.3	-	-	-
2	Glassy Carbon	984	61.6	-	-	-
3	PF-60	595	235	7.6 e-3	7.7 e-3	1.0 e-3 s
4	PF-60	577	312	2.1 e-2	2.8 e-2	37.2 s
5	S-200-FH	649	346	6.7 e-3	1.0 e-2	37.2 s
6	AlBeMet	932	211	9.3 e-3	1.0 e-2	2.8 e-3 s
7	I-220-H	718	360	7.4 e-2	1.2 e-2	37.2 s
8	Glassy Carbon	1244	79.4	-	-	-

表 2 の右から二列目には、1 発目のビームパルス照射終了時点である 7.2 μ s での塑性変形によるひずみと、計算が発散する時点 (最右列に記載) でのひずみをそれぞれ示す。

No.3-7 の Be 系窓の全てが塑性変形により形状が大きく変形する結果、2 発目のビームまでには計算が破綻する結果となった。PF-60 製のベンチマーク (No.4) よりも厚みを増した No.3 が最速で計算が発散したのは意外だったが、No.6 の AlBeMet は最高温度が 932 °C であり、融点の 1082 °C に肉薄しているためこちらも No.4 より早い段階で計算が発散した。以上から、ケース 2 以上の強度のビーム試験を行うと AlBeMet が破損しそうであることがわかった。

2.4 3 mm 厚の PF-60 窓の調達に間に合わない！

夏も終わりに差しかかり、SMAUG 試験の準備も佳境という試験直前に、急遽ビーム窓の配置を変更するという知らせが届いた。なんと、3 mm 厚の PF-60 の調達に間に合わないとのこと。PF-60 は純度の高い Be であるが、これは非常に高価であり、かつ製造が非常に難しいそうである。試験直前であり時間的猶予もなかったため、レイアウトの変更には私は関与せず、SMAUG 試験をリードしていた同僚の Nicola が検討した。そのレイアウトを表 3 に示す。

表 3. SMAUG 試験本番のビーム窓の配置

No.	Material	Medium	Thickness [mm]
1	Glassy Carbon	Air	2
2	Glassy Carbon	Vacuum	2
3	PF-60	Air	0.254
4	S-200-FH	Vacuum	3
5	I-220-H	Air	3
6	S-200-FH	Vacuum	3
7	Glassy Carbon	Air	2
8	Glassy Carbon		2

ここで、Medium は各ビーム窓間の空間の状態を表す。図 2 および表 1 の事前検討案と比較すると、3 mm 厚の PF-60 と AlBeMet が除かれ、Glassy Carbon と S-200-FH が追加されており、空気と真空の位置が入れかわっている。AlBeMet が除かれた理由は上記の解析結果によるものと考えられ、CERN の最先端科学プロジェクトの重要な場面で自分の解析が意思決定の役に立ったことに嬉しさが込み上げたのを覚えている。また、図 4 に実際の SMAUG 試験でのパルスリストを示す。No.1-6 まで異なる条件のビームをビーム窓の違う位置に照射した。パルスリストには事前解析を行なったケース 3 ($\sigma=0.25\text{mm}$)がないことが分かる。これも、解析結果からケース 3 ($\sigma=0.25\text{mm}$)は照射条件が過酷すぎるとわかったためであり、併せて解析を行なった意味を確認できた。最後に SMAUG 試験の再現解析を実施し、SMAUG 試験に関するビーム窓解析業務は終了した。その後、試験窓の調査が進められている。図 5, 6 に現場での記念写真を示す。

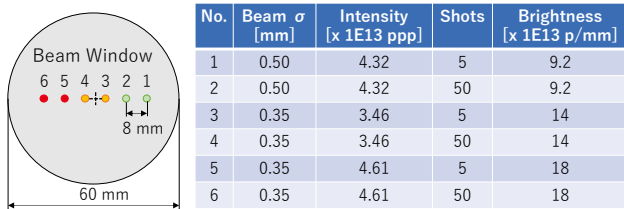


図 4. SMAUG 試験のパルスリスト



図 5. SMAUG 試験装置を背景にメンバーと記念写真[1]

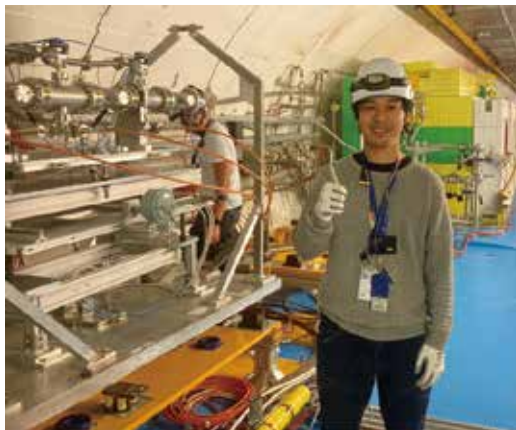


図 6. HiRadMat 施設に SMAUG 試験装置を設置する様子

3 次世代版 TT-20 TED の開発

次に、TT-20 TED の開発について説明する。TT-20 とは、SPS リングと North Area を繋ぐビーム経路のことである(図 7)。TT-20 TED は、SPS リング内で不要となったビームを廃棄するためのビームダンプとして利用される。図 8 に、TT-20 TED の外観を示す。TT-20 TED にはモータが搭載されており、ビームライン外からビームライン上への遠隔操作が可能である。

North Area には、ECN3 と呼ばれる地下実験施設が存在するが、この ECN3 が将来の大強度ビーム実験施設として有力な候補場所となっており、ECN3 タスクフォースの名で検討が進められている。この実現のためには、TT-20 TED も大強度ビームに耐えられなければならないが、TT-20 TED は約 40 年前に製造されたものであるため、昨今の大強度ビームでの運用は想定されていない。そこで、まずは ANSYS を用いた解析により現行の TT-20 TED のビーム耐力を確認し、次いで ECN3 タスクフォースの要求に応えられるような次世代版 TT-20 TED の構成案を、解析に基づき設計検討していくこととなった。

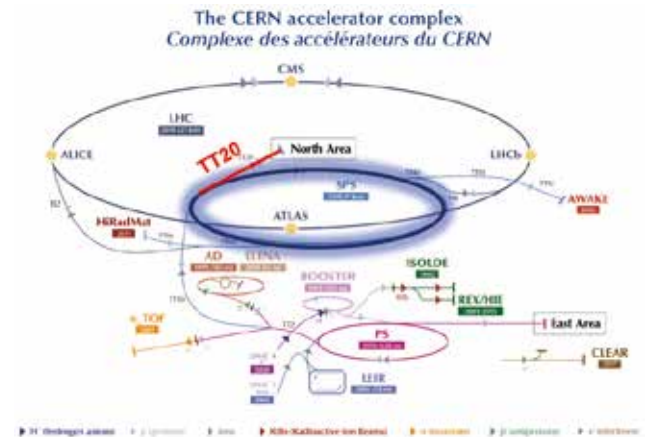


図 7. CERN の加速器構成と TT-20 の位置関係[1]

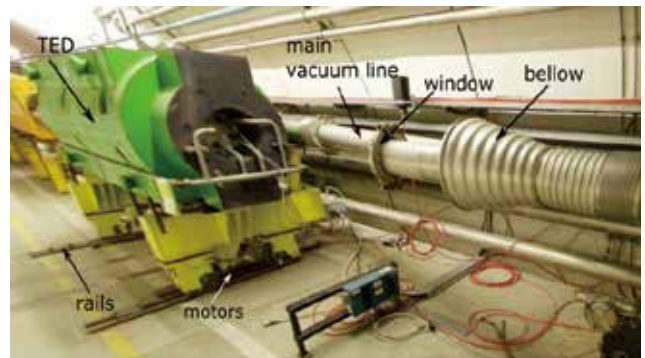


図 8. TT-20 TED の外観

3.1 現行版 TT-20 TED の解析条件

現行の TT-20 TED の構成を図 9 に示す。TT-20 TED は、長さ 2 m、直径 273 mm の二つのブロックが連なる形で構成されており、上流側は Al、下流側は CuCr1Zr（銅に固溶元素を混ぜて高温強度を向上させた材料）である。



図 9. TT-20 TED の構成

ビーム条件は、440 GeV/c のエネルギーを持つビームの照射を想定している。解析するビームオペレーションモードは、RUN3 と将来予測されるビーム条件から表 4 の左 4 列に示す通りに選定された。なお、TT-20 TED は冷却のために各ブロックに 90 度置きに $\phi 18$ mm の冷却水流路が 4 つ設けられており、解析においてその冷却効果は算出した乱流熱伝達率 $14 \text{ kW/m}^2\text{K}$ を配管表面に与えることで組み込んでいく。解析順序については、はじめに時間平均した発熱密度を与えて定常解析を行い、次いで 1 パルス分の過渡解析を実施することで最高温度と発生応力を評価した。

3.2 現行版 TT-20 TED の解析結果

解析結果を示す前に、TT-20 TED の構成ブロックである Al と CuCr1Zr の構造強度について説明する。

100 °C 以下での Al と CuCr1Zr は降伏強度がほぼ同等となるが、CuCr1Zr は温度が増加するにつれて降伏強度が線形に遞減していくのに対し、高温に長時間晒された Al は 150 °C 以降で急速に降伏強度が減少し、CuCr1Zr よりも遥かに小さい値となることがわかっている。従って、Al が塑性変形するかどうかは現行の TT-20 TED の構造健全性評価の肝になることがわかるため、表 4 には Al のみの解析結果を示す。

解析結果から、ビーム強度が 3×10^{13} ppp 以上の条件では多くのケースで塑性変形によるひずみ (A. E. S. (Accumulated Equivalent plastic Strain), 表 4 最右列) が正の値となっており、塑性変形が発生してしまっていることがわかる。このことから、現行の TT-20 TED は 2×10^{13} ppp 程度のビーム強度までしか耐えられないことが確認できたため、ECN3 タスクフォースで検討されている将来的なビーム強度の要求値 4×10^{13} ppp には耐えられないことが示された。

表 5. 次世代版 TT-20 TED での最も厳しいビーム条件での解析結果

OPERATIONAL MODES	GRAPHITE				Al						CuCr1Zr					
	Steady State		Transient		Steady State			Transient			Steady State			Transient		
	Max T [C]	Max Chr.	Max T [C]	Max Chr.	Max T [C]	Max VM [MPa]	A.E.S.	Max T [C]	Max VM [MPa]	A.E.S.	Max T [C]	Max VM [MPa]	A.E.S.	Max T [C]	Max VM [MPa]	A.E.S.
Intensity: 4E13 [ppp] PL: 1 [s] PT: 7.2 [s]	226	0.69	261	0.72	192	197 (Center : 87)	0	220	212 (Center : 105)	0	138	138	0	171	161	0

A.E.S.: Accumulated Equivalent plastic Strain, Chr: Christensen Criterion, PL: Pulse Length, PT: Pulse Time, VM: Von Mises Stress

表 4. 現行版 TT-20 TED の Al ブロック部の解析結果

Aluminum						
Operational mode				Max T [°C]	Max Von Mises [MPa]	A. E. S.
Intensity [ppp]	Pulse Length [s]	Pulse Interval [s]	Average Power [kW]			
MD - High repetition:						
4E+13	1	9.6	293	290	218	4.94E-03
2E+13			147	194	156	4.13E-06
MD - Low repetition:						
4E+13	1	60	47	230	169	1.54E-03
2E+13			23	129	115	0
BDF:						
4E+13	1	7.2	391	400	250	5.95E-03
3E+13			293	310	200	3.55E-03
2E+13			196	219	154	6.23E-04
4E+13		30	94	254	168	2.19E-03
3E+13			70	198	165	4.23E-04
2E+13			47	141	123	0
NORTH AREA:						
4E+13	4.8	30	94	164	133	0
	9.6		94	128	93	0

3.3 次世代版 TT-20 TED の概念案の検討

前節までの検討から、大強度ビームに耐え得る次世代版 TT-20 TED の開発が必要であることがわかった。この形状案については同僚の Nicola が中心となり様々な検討を重ねたが、誌面の都合で最終的な形状案のみを図 10 に示す。

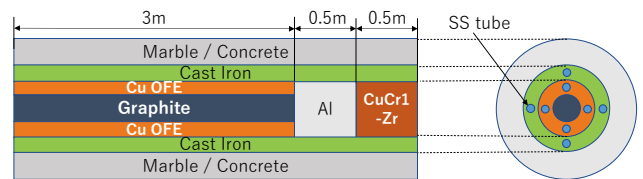


図 10. 次世代版 TT-20 TED の形状案概念図

図 10 において中心部が Graphite のブロックが最上流に位置し、次に Al、最下流に CuCr1Zr が配置される。Graphite は Cu OFE (Oxygen Free Electronic Grade) の筒に囲まれており、焼き嵌めにより接合される。これらのブロックの外側には円筒形の Cast Iron が覆い、最外周部は大理石かコンクリートが候補材となっている。表 5 に、最も熱・構造的に厳しいビーム条件 (ビーム強度: 4×10^{13} ppp, パルス長: 1 s, パルス周期: 7.2 s) での解析結果を示す。構造健全性評価の指標として、Al および CuCr1Zr は金属であるため塑性変形の有無で判断するが、Graphite は非金属であるため Christensen Criterion[4]が 1 以下かどうかで判断する。

解析の結果, Al, CuCr1Zr ともに塑性変形は発生しておらず, また Graphite での Christensen Criterion の最大値は 0.72 であるため, 構造健全性が確認できたと言える。しかし, 本解析では接触熱抵抗は導入しておらず, また冷却水流量も通常運転時を仮定しているため熱的には理想的な条件と言える。従って, より現実的な解析条件を導入すると共に, 不確実性がある冷却能についての感度解析が必要である。

3.4 次世代版 TT-20 TED の詳細構造検討

理想的な熱的条件での評価であれば, 将来的な大強度ビームに対して次世代版 TT-20 TED の概念案が熱・構造的に成立することがわかったため, Graphite と Cu OFE 筒の詳細な構造を検討した。図 11 にその構造案の断面図を示す。

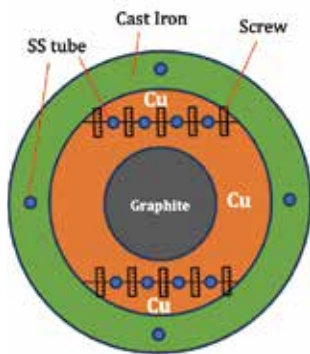


図 11. 次世代版 TT-20 TED 上流部の詳細構造検討

ここで, Graphite と Cu OFE 筒とは焼き嵌めにより結合する。また, 水配管のステンレスチューブと Cu OFE 筒とを密着させるために, ステンレスチューブを半分ずつ挟む位置で Cu OFE 筒をカットしてネジで固定する。以下に, 保守的な接触熱抵抗値を導入した熱解析の境界条件を示す。

- 各配管の水流量: 1.5 m³/h, 配管内径: 15 mm
- 水と配管との熱伝達率: 10.6 kW/m²K
- 接触熱抵抗 (保守的評価値):
 - Graphite – Cu OFE 間 : 5000 W/m²K
 - 水配管 – Cu OFE 間 : 2000 W/m²K
 - Cu OFE – Cu OFE 間 : 5000 W/m²K

上記の条件での熱解析の結果を表 6 に示す。

表 6. 接触熱抵抗値を導入した熱解析結果

OPERATIONAL MODE	GRAPHITE	Al	CuCr1Zr
	Max T [°C]	Max T [°C]	Max T [°C]
Intensity: 4E13 [ppp] PL: 1 [s], PT: 7.2 [s]	439	299	231
Intensity: 1E13 [ppp] PL: 1 [s], PT: 7.2 [s]	120	95	74

表 6 を見ると, 4×10¹³ ppp の最も熱的に厳しい条件では, 保守的な接触熱抵抗を導入すると Graphite と Al が特に高温になっている。時間の制約から構造解析までは実施できずに研修終了となってしまったため, 最高温度による推定に過ぎ

ないが, Graphite と Al は構造健全性が保たれない結果になると予想される。一方で, ビーム強度を 1×10¹³ ppp まで落とした条件では成立することが見込まれる。以上から, 4×10¹³ ppp のビーム強度に耐え得る次世代版 TT-20 TED の開発には, 更なる評価と最適化設計が必要である。

4 おわりに

誌面の制限で記載できなかった仕事もあったが, 以上が CERN 派遣研修期間中に私が実施した業務内容である。最後に業務以外のことについて述べると, CERN での生活の中で最も印象的だったのは, 欧州のエリート達の語学力の異常な高さである。CERN のエンジニアであれば英語はほぼ全員が準ネイティブレベルであることはもちろんのこと, 3-4ヶ国語を自在に操るのが当たり前であることは, 日本との大きな差 (壁) を感じた。また, 科学のフロンティアを開拓するために必要な最先端技術開発が国際協力の元で実施されているのを目の当たりにした。その一員として活躍できるグローバル人材となるためにも, 今後長期スパンで英語と技術力を研鑽していこうというきっかけとモチベーションを得られたことは, 個人的には大きな収穫だった。

謝辞

私の CERN 派遣研修は沢山の方のご協力とご支援のおかげで実現しました。特に, 本研修にて CERN 側と繋がるパイプ役になってくださった KEK 素核研の牧村俊助さん, 担当している COMET 実験が佳境であるにも関わらず送り出してくれた上長の鈴木純一さんと COMET グループの方々, コロナ禍により各方面とイレギュラーな事務対応をいただいた野村恭子さんら KEK 国際企画課の方々, 同時期に CERN に派遣されて苦楽を共にした同じく国際企画課の江口洋さん, 研修受け入れをご快諾いただいた CERN STI/TCD グループ長の Marco Calviani さん, 英語が不自由な東洋人を相手に根気強く仕事の面倒を見てくれた Nicola Solieri さん, CERN の Ph.D. 学生で公私ともにお世話になった友人の J. Baptiste さん, そして, 幾多の困難が待ち受けていることを承知の上でヨーロッパにまでついてきてくれた妻と子供たちに, この場を借りて心から感謝の意を表明します。

関係者の皆様, ありがとうございます。

参考文献

- [1] N. Solieri, “Beam windows at CERN and studies at the HiRadMat facility”, NBI2022 (2022).
- [2] <https://fluka.cern>
- [3] <https://www.cybernet.co.jp/ansys/>
- [4] Christensen, R.M., Pro. Royal Soc. London, Vol. 453, No. 1962, pp. 1473–1491 (1997)