

# VALUE ENGINEERING AND THE EVALUATION OF CONSTRUCTION WORK OF J-PARC 50GeV MR TUNNEL AND OTHER FACILITIES

Masanobu Miyahara<sup>1</sup>, Satoshi Itaya, Kenichi Wakabayashi, Kaoru Fukawa,  
Shinya Yamauchi, Sousuke Kobayakawa, Erika Tamamori  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0081

## Abstract

The construction work of J-PARC 50GeV MR Tunnel and other Facilities was completed in the spring of 2007. Now the final adjustment of the accelerator equipment is progressing aiming at beginning a real beam experiment. A lot of value engineering was proposed at all stages from the design phase to the construction stage in this project. This report shows the outline of typical five VE cases, and describes the verification and the evaluation of the results.

In all cases, it was able to be verified that these proposals had achieved the intended purpose by analyzing the result. We confirmed it might be profitable to use the VE Method at the accelerator construction project of the future.

## J-PARC 50GeV MRトンネル等の建設におけるバリューエンジニアリング (VE) とその評価

### 1. はじめに

大強度陽子加速器計画 (J-PARC) 50GeVシンクロトロンMRトンネル等の建設は2002年に着工、5年余りの工事期間を経て2007年3月、付属建家及び設備工事を含め、ほぼ全ての工事を終了した。現在、2008年12月からの本格的なビーム運転開始に向けて、実験機器の最終調整が進められている。

このプロジェクトでは、MRトンネル等の土木工事にあたって、設計段階から契約後の施工期間に及ぶ、あらゆる段階で様々なバリューエンジニアリング (VE) が提案された。本報告は、このプロジェクトで実施されたVEの中から代表的な事例を取り上げ、その概要を紹介すると共に、その結果を分析することによって、本プロジェクトにおいてVEがもたらした成果とその役割について検証・評価を行うものである。

### 2. J-PARC加速器土木の概要

本稿では、50GeVシンクロトロンMRトンネルをはじめ、原子核・素粒子 (ハドロン) 実験施設及び、ニュートリノ実験施設の、主としてビームライントンネルの土木工事を考察の対象とする。これらの施設群の全体配置を図1に、各施設の規模・概要を表1に示す。

中でも、中核となる加速器トンネルは、周長約1.5kmに及ぶMRトンネルで、それぞれ三つの直線部と曲線部で構成されるリング状トンネルである。上流部のRCSからビームを入射する3-50BTトンネル、MRからハドロン実験施設へビームを分岐するスイッチャードトンネル、及びニュートリノアーク部トンネルを含め、延約2kmのビームライントンネルである。

図1: 50GeVシンクロトロン施設配置図

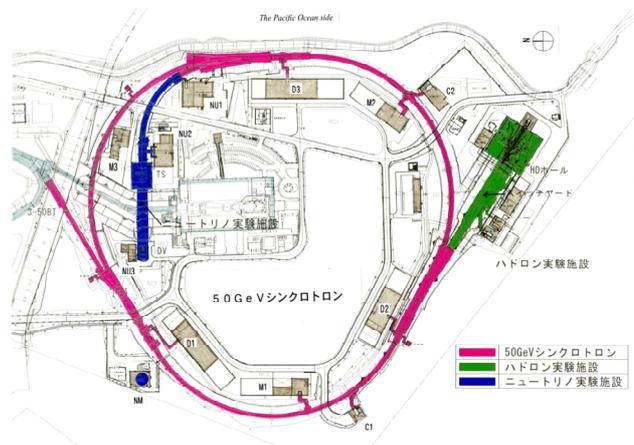


表1 主要加速器トンネルの概要

ビームライントンネル		内空 m		躯体厚 m		基礎種別
名称	全長m	幅	高	床	壁	
50GeV-MR	1,568	*	*	*	*	PC杭
<アーク部>	1,118	5.0	3.5	1.2	1.0	〃
<直線部>	254	7.0	3.5	3.2	2.2	〃
<拡幅部>	196	13.0	6.0	3.5	2.8	〃
3-50BT	134	5.0	4.5	3.5	2.9	〃
スイッチャード	137	8.0	6.0	4.5	4.5	〃
ニュートリノ/BT	112	6.0	3.5	1.6	1.3	〃

\*内空、躯体厚の数值は各部位の代表的な断面の寸法を示す

<sup>1</sup> E-mail: [masanobu@mail.kek.jp](mailto:masanobu@mail.kek.jp)

### 3. J-PARC土木におけるVE

一般に、建設工事におけるVEは「建設業者から施工方法等に関する提案を募集し、民間の技術力を活用して建設コストの低減を図るもの」と定義される。しかしながら、超精密機器が据え付けられるビームライントンネル等の加速器施設にとって、要求性能と建設コストの配分には絶妙な合理性が求められる。

そこで、本稿で展開するVEの概念を共通認識するため、一般概念に加え、品質とコストの関係に着目したタイプ類型を図2に示す。また、本プロジェクトで採用されたVE事例の概要と特性を表2に示す。

#### 3.1 低発熱コンクリート

J-PARCの加速器トンネルは、実験に伴って発生する強い放射線によって、トンネル周辺の土壌や地下水が放射化するのを防ぐため、場所によっては3~4mに達する厚いコンクリート断面が必要となった。

一方、このような大量のコンクリート打設は、水和反応時の多大な発熱によって、有害なひび割れを発生させることが経験的に知られており、ひび割れ防止策として低発熱セメントの採用が議論に上った。

セメント会社との共同により、本構造体をモデルとする温度解析シミュレーションを行った結果、低発熱セメントを使用することで普通セメントに比べ、ひび割れ発生確率が95%から10%程度に低減できることが判明、設計VEとしての採用に至った。図3~図5参照

#### 3.2 低放射化コンクリート

J-PARCの加速器は、これまでにない大強度の陽子加速器であるため、入射部や出射部で発生するビームロスによって、トンネル本体のコンクリートにも強い放射化をもたらす。図6に示すようにトンネル内で強いガンマ線が放射されると、メンテナンス時の被曝線量が増大するため、低放射化への取り組みが重要課題となった。従前から、石灰石骨材を使ったコンクリートが低放射化性能を発揮することは既知であったが、計画段階では、国内での生産実績がほとんど皆無の状況であった。

そこで、全国の石灰石について市場調査を行うと共に、サンプルコンクリートを製作、KEKの12GeV陽子シンクロトロンでビーム照射試験を実施した。試験の結果、従来の非石灰石コンクリートに比べ、トンネル内での被曝線量を1/10以下に低減できることが科学的に実証され、国内初の本格的な実用化が実現することとなった。

#### 3.3 躯体改質防水

水密性を強く要求される加速器にとって、地下水面下に埋設するトンネル構造物での防水性確保は極めて過酷な要求である。本施設では、KEKにおける直近の試験工事などの結果を踏まえ、無機質セメント結晶増殖材(ザイバックス)を設計VEとして採用した。

施工後、性能検証のためMRトンネル本体から採取したコンクリートを使って、透水試験並びに電子顕微鏡(SEM)解析を実施、コンクリート表層部の緻密化とひび割れ部の自己修復作用のメカニズムを確認した。

図2: VEの概念とタイプ(類型)

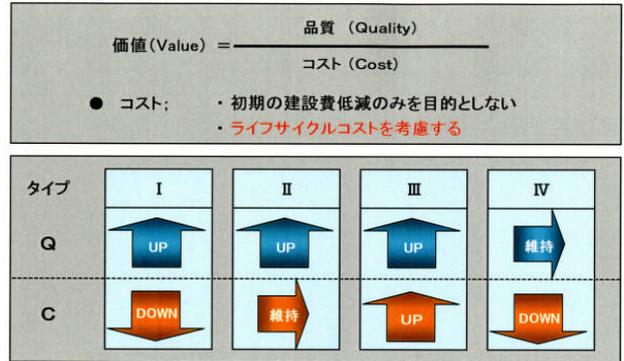


表2 VE提案事例の概要

VE事例(Case)	提案主旨			提案時期			タイプ
	A	B	C	設計	入札	施工	
1. 低発熱コンクリート	○			●			III
2. 低放射化コンクリート	○			●			III
3. 躯体改質防水	○	△		●			II
4. パイルドラフト基礎	△	○	△			●	I
5. 地盤改良基礎	△	○	○		●		I

提案主旨A: 設計仕様を見直し品質向上を図る。

B: 設計理念を見直しコスト低減を図る。

C: 設計理念を見直し工期の短縮を図る。

図3 温度解析モデル

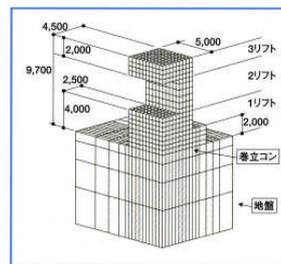


図4 ひび割れ発生確率

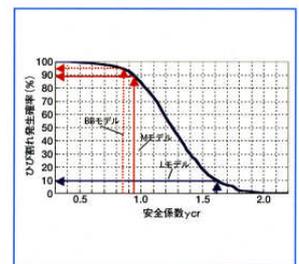


図5 ひび割れ指数分布

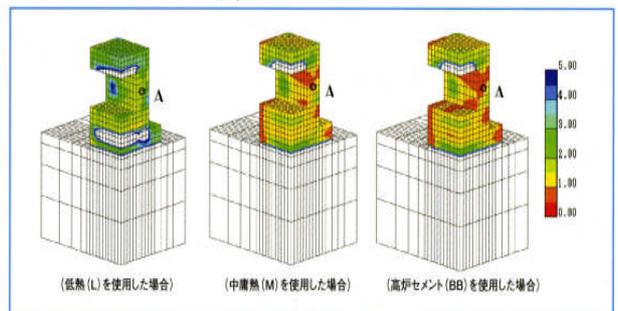


図6 放射化のメカニズム

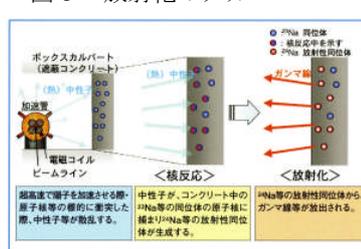
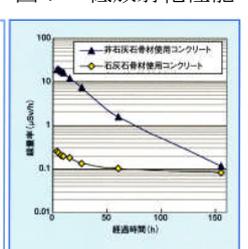


図7 低放射化性能



### 3.4 パイルド・ラフト基礎

ハドロン実験ホールは、基礎スラブの最大厚が9mにも及ぶ重量構造物で、当初設計では深い基盤を支持層とする長尺の杭基礎で設計された。敷地内の先行工事で、杭基礎構造物の予想を超える沈下の発生が報告され杭基礎の設計思想が議論されていた。

その状況下で、同工事を請け負った共同企業体から、基礎構造を杭基礎からパイルド・ラフト基礎に変更するVE案が提案された。これは、ある程度の沈下を許容することによって、杭基礎と直接基礎が複合して上部荷重を支えるというもので、事前の沈下予測解析や載荷試験の実施など、入念な予備検討と詳細な変更設計を行い契約後VEが成立した。

本建屋は竣工後1年以上が経過したが、着工前から継続している地盤と基礎構造体の挙動計測の結果、図10に示す通り、沈下量が予測値以下に抑制されており、目標性能を満足していることが確認された。

### 3.5 地盤改良基礎（ハラフレンダー）

ニュートリノ実験施設のターゲットボリューム部は、様々な微粒子が通過する箱状の鋼製パイプを、約6m厚さの遮蔽コンクリートで囲む特異な実験施設である。構造体を支える基盤層は比較的浅いため、原設計では土砂を無筋コンクリートで置換える直接基礎が採用された。

ハラフレンダーによる地盤改良基礎案は、総合評価落札方式による入札に際し、現請負会社（入札参加業者）からの提案で、発注者の求める大幅な工期短縮と工事費の低減という厳しい要求条件に対する独創的な技術提案であった。本工法は、掘削可能な深度まで開削し、セメントミルクを地中で噴射しながら現地土を攪拌して地盤強度を改善、不同沈下の少ないマット基礎の構築を目指した工法である。

本工法の性能検証のため、地盤と構造体の沈下量を継続的に計測した結果、図12の通り極めて微小な変位に留まっており、地盤改良性能が検証された。

## 4. VEの検証と評価

VE事例を検証した結果、コスト削減や工期短縮、または、品質向上等に卓越した成果が確認され、本プロジェクトの進展に多大な貢献をしたと評価される。各事例毎にその成果を要約する。

- (ケース1) 低発熱コンクリート：コンクリート打設後2～3年経過した時点で、ひび割れ発生率が普通コンクリート比で約1/10～1/20以下に低減、ひび割れ幅も小さい。
- (ケース2) 低放射化コンクリート：事前のビーム照射試験であらかじめ性能については確認済みであったが、今後のJ-PARCのビーム実験でその性能が再検証される。
- (ケース3) コンクリート改質防水：打ち継ぎ部やひび割れ箇所での止水状況から所定の改質効果が確認された。
- (ケース4) パイルド・ラフト基礎：杭工事費を大幅に削減しながら、即時沈下量を想定範囲に抑制、実験グループの求める基本的な要求性能を確保した。
- (ケース5) ハラフレンダー基礎：建設コストの低減と工期の大幅短縮を図りつつ、最終沈下量も予想を超える微小レベルに抑制、施設の安定性確保に貢献した。

図8 ハドロン実験ホール

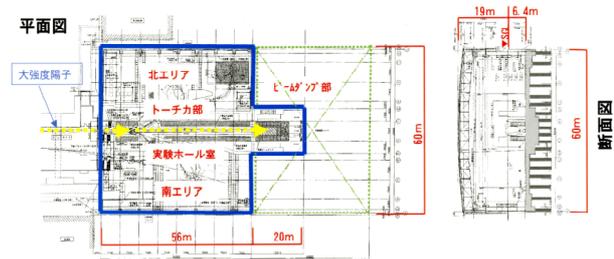


図9 パイルド・ラフト概念

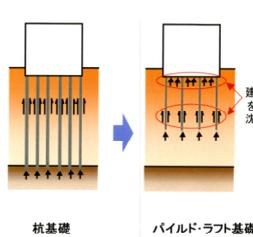


図10 地盤と基礎の鉛直変位



図11 ニュートリノ配置図

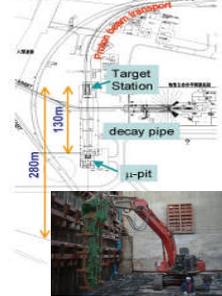
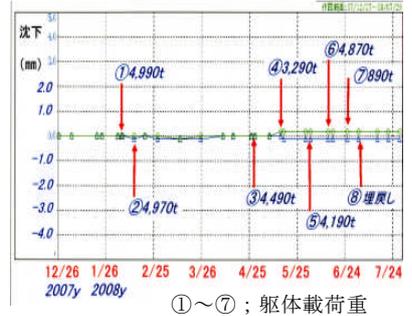


図12 層別沈下量の経時変化



## 5. 最後に

本報告では、個々のVE事例の概括的な紹介にとどめ、プロジェクトにおいてVEの果たした役割や有効性についての検証に焦点をあてた。この報告内容は、とりもなおさず、J-PARC加速器土木の大きな成果の一つと捉える。これらの手法が将来の新たな加速器建設プロジェクトの際に活用されれば幸いである。

最後に、本報告で取り上げたVE事例の提案者や提案企業の関係者をはじめ、多くの現場担当者、専門技術者の皆様方の努力に感謝の意を表します。さらには、ユーザーの立場から、ご理解ご支援をいただいた加速器建設グループやハドロン及びニュートリノ実験グループの皆様へ紙上を借りてお礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] 滝本雅樹他. 「大強度陽子加速器の建設とそのコンクリート」について, July 2006 CEM, S太平洋セメント (株)
- [2] 三浦太一他. 「コンクリート及びその材料の陽子加速器照射試験」, 日本原子力学会2003, 高エネルギー加速器研究機構
- [3] 吉岡正和. 「特別企画プロジェクト J-PARC大強度陽子加速器計画」, 文教施設 2006年第21号
- [4] T.Yamada, et. "Value engineering and observation of settlement behaviour on piled-raft foundation of Hadron Experimental hall of J-PARC", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007