

PRESENT STATUS OF KLYSTRON POWER SUPPLY SYSTEMS FOR J-PARC LINAC 2012

- Recovery from Earthquake Disaster, HVDCPS Breakdown and Energy Upgrade -

Masato Kawamura^{#,A)}, Etsuji Chishiro^{B)}, Toshihiko Hori^{B)}, Shin-ichi Shinozaki^{B)}, Fumiaki Sato^{B)}, Yuji Fukui^{A)},
Kenta Futatsukawa^{A)}, Masayoshi Yamazaki^{C)}, Ryu Sagawa^{D)}, Mitsuteru Yukitake^{D)}, Shin-ichi Ogawa^{D)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA), 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

^{C)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd., 2-8-8 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0045

^{D)} Infrastructure Systems Company, Hitachi, Ltd., 5-2-1 Ohmika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1293

Abstract

After the Great East Japan Earthquake, the klystron power supply systems for the J-PARC 181MeV linac had recovered in last October, and restarted the all-day operations in last November. In this March, the high-voltage DC power supply #1 (HVDCPS#1) broke down. The cause was the breakdown of the condensers, which were the parts of the stacks of the diode circuitries. For the linac energy upgrade to 400MeV, the new power supply systems were tested.

J-PARC リニアック用クライストロン電源システムの現状 2012

— 震災復旧、高圧直流電源故障、エネルギー増強 —

1. はじめに

昨年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により J-PARC の各施設は被害を受けた。J-PARC リニアック高周波源の昨年 7 月末における状況について、前回の本研究会で「震災の被害が大きく、復旧作業が思うように進んでいない」と報告した^[1]。しかしその後、出来るだけ早急にリニアックのビーム運転を再開するため、復旧作業の取捨選択等を行った。具体例として、建家・設備等は加速器運転の支障となる箇所(放射線管理に必要な出入扉、等)の復旧、機器はクライストロン電源システム^{[2][3]} クローバ用イグナイトロンの回復、震災で傾いた制御用 19 インチラックの高さ調整、等を急ピッチで行った。その結果、クライストロン電源システムは昨年 10 月中旬に試運転、11 月上旬に 181MeV 用全機器の終夜連続運転を再開した。そしてリニアックのビーム運転は 12 月 9 日に再開を果たした。震災から 9 ヶ月弱、273 日後である。以後クライストロン電源システムは、年末年始の休み・機器の不具合・8 時間以下のメンテナンスを除き、今年 7 月 2 日まで終夜連続運転が行われた。

本論文は当クライストロン電源システムの現状報告であり、震災復旧作業からイグナイトロンの回復、19 インチラックの高さ調整、運転中の機器の不具合から高圧直流電源 1 号機(HVDCPS#1)用変圧整流器(HVTR#1)の故障について報告する。

またリニアックエネルギーの増強(現状の 181MeV から 400MeV へ)は、震災の影響を受け、当初の予定より 1 年遅れて 2013 年度に行われる^[4]が、当クライストロン電源システムについては可能な

限り先行して作業が行われたので、本論文の最後に報告する。

当電源システムを構成する機器のアノード変調器において、運転当初より懸案だった絶縁油タンク内放電^{[2][4]}の対策については、本研究会で千代氏より報告がある^[5]。また、二ツ川氏の報告^[6]には J-PARC リニアック高周波源の震災復旧、HVTR#1 交換後の LRRF 制御について報告があるので参照されたい。

2. 震災復旧作業

2.1 イグナイトロンの回復

当電源システムにはクローバ装置^[7]があり、クライストロンの短絡時にそれを保護するため、コンデンサバンクに蓄積されているエネルギーを極めて速やかにバイパスさせる働きを持つ。J-PARC リニアックの運転ではアノード変調器内の放電が発生した時にもクローバ装置が動作しており、機器の保護のために不可欠な装置である。素子はイグナイトロン (National Electronics、NL7703EHVNP)^[8]を絶縁油タンク内で使用しており、クローバ装置 1 台あたり 4~5 個のイグナイトロンを使用している。

震災後の昨年 5 月下旬から 6 月初めにかけてクローバ装置の動作試験を行ったところ、HVDCPS#1、#3、#5 用クローバ装置(Crwbr#01、#03、#05)が動作しない(イグナイトロンが fire しない)事がわかった^[1]。昨年 9 月下旬より絶縁油タンクからイグナイトロンを取り出してイグナイタ (I)ーカソード (K)間の抵抗値を測定したところ、リニアック 181MeV 運転用 Crwbr#01~#06 の 6 台で

[#] masato.kawamura@kek.jp

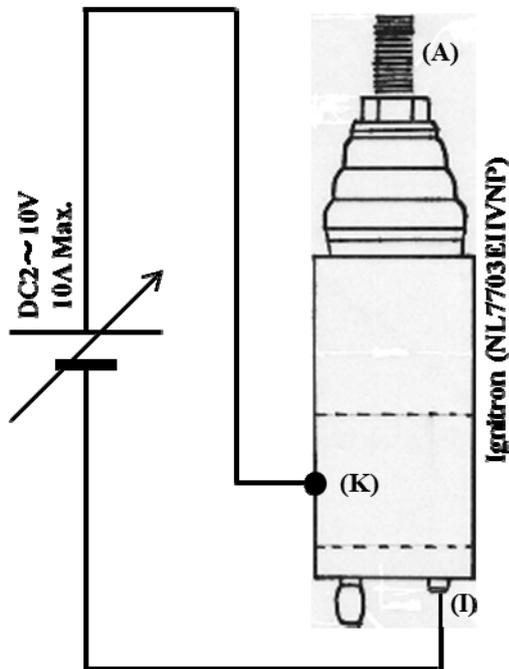


図1：イグナイトロン イグナイタ(I)ーカソード(K)間抵抗値回復法接続図 (A：イグナイトロンアノード)

使用しているイグナイトロン 29 本(Crwbr#01~#05 で各 5 本、Crwbr#06 で 4 本使用)のうち 24 本が 10Ω 以下に低下している事がわかった。これは地震の揺れによって、イグナイタが内部にある水銀をかぶったためとみられる。

イグナイトロン回復方法(イグナイトロンイグナイタ(I)ーカソード(K)間抵抗値回復法)については、震災後すでに東芝電子管デバイス(株)工場にてニチコン草津(株)の実績があったので、これを行った。図1に示すように(必ずアノード(A)を上向きに設置)、直流電源(電流メータ付き)の+をK、-をIに接続する。操作手順は以下の通り。

- ①出力電流値を確認しながら電圧を 1 秒で 1V ずつ上げていく(電流値も徐々に増加する)。
- ②・項①手順中に電流値が(急激に)下がった場合、すぐに電圧を off する。
 - ・電流値が下がらず電圧 10V まで到達した場合は、そのまま 10 秒程度放置した後、電圧を off する。
 - 放置している間も電流値を監視し、電流値が下がった時はすぐに電圧を off する。
- ③電圧を off した後しばらく放置してイグナイトロンが室温程度に冷えた後、I-K 間の抵抗値を測定する。
 - ・抵抗値が 10Ω 未満の場合は項①~②を再度行う
 - ・抵抗値が 10Ω 以上の場合は④項へ。
- ④I-K 間を短絡した状態で、1000V メガーで A-K 間耐電圧を測定する。測定値が ∞ なら正常(回復成功)、それ以外は異常(回復失敗)とする。

する。

抵抗値が低下していた 24 本に上記の回復法を行ったところ、20 本が回復し(回復率 83.3%)、1 本は I-K 間抵抗値が回復せず、3 本は A-K 間耐電圧が低下した。

J-PARC リニアック内にある他の(震災時、運転していなかった)全てのイグナイトロン、すなわち 400MeV 増強用クローバ装置(Crwbr#08~#11、Crwbr#07 はイグナイトロン無し)、324MHz テストステーション⁹⁾用装置(Crwbr#00、但し気中仕様 NL7703EHV 6 本)、972MHz テストステーション用装置(Crwbr#12)、また Crwbr#12 を JAEA 構内で運搬した際に不具合が生じたもの、及び予備用新品の計 41 本について I-K 間抵抗値を測定した。結果は、Crwbr#00、#08、#09、#11、#12、新品は全て正常、Crwbr#10 の 3 本が正常、2 本が異常、運搬で不具合が生じたものは 5 本全てが異常だった。異常があったものには上述の I-K 間抵抗値回復法を施し、6 本が成功、1 本が抵抗値が回復しなかった。更に Crwbr#08~#12 用で抵抗値が正常なものについて電圧エージングを行った。この結果、40 本が運転可能な状態となり、このうち(油中仕様) 4 本を 181MeV 運転用として交換した。

2.2 19 インチラックの高さ調整

クライストロンギャラリーの各ステーション(181MeV 運転用として 20 ステーション(RFQ、DTL1~3、SDTL01~15、DB1)がある)には当電源システム制御用の他、全体制御用、LLRF 用、空洞真空・集束磁石電源用、ビームモニタ用として、二幅の 19 インチラック 6 台が横一列に並び(DTL3 ステーションには更に一幅 1 台が並ぶ)、全体で 121 台ある。震災により、クライストロンギャラリーのゆか面に亀裂が生じ、その周辺が盛り上がるなどしているため、ケーブルにテンションがかかったり、ラックが変形して扉の開閉が不自由になったりしていた¹⁰⁾。

昨年 8 月下旬より高さ調整の作業を行った。上記ステーションでは天井クレーンが使用できなかったため油圧ジャッキなどでラックを持上げ、スペーサを差込む、という手順で行い、昨年 10 月中旬の試運転調整の開始までに終了した。現在は 121 台のラックのうち、前面扉下のみで 81 台(66.9%)にスペーサが差し込まれている。(なお、ラックの高さ調整は 400MeV 増強部分でも行われたが、本報告では省略した。)

2.3 その他の震災復興作業

クライストロンギャラリーの天井クレーンは、現在(2012 年 7 月末)も大部分が使用出来ず、昨年報告したアノード変調器のアンカーボルトは破断したまま¹¹⁾である。他にクライストロン高压電源室 #1、#2 間の壁の石膏ボード¹²⁾改修はまだ行われていない(これらを改修しないまま昨年 10 月から今年 7 月までの運転を行った)。

これらの改修作業は今年 9 月下旬までの夏季

シャットダウン中に行う予定である。

3. 高圧直流電源故障及び震災復旧後の運転状況

3.1 復旧後の運転状況 (今年3月下旬まで)

1章「はじめに」で述べた通り、昨年10月中旬に試運転、11月上旬に181MeV用全機器の終夜連続運転を再開した。当電源システムについては幸いにも、2章で述べたイグナイトロン、19インチラックを除けば震災による影響は無かったと見られる。

昨年12月19日早朝と、19日から20日にかけての深夜に、HVDCPS#2号機がクローバ動作でHV downする現象が頻発した。調査の結果、SDTL01ステーションのクライストロンメインコイル電源(IDX製IPM-500204-A2)の停止が原因とわかり、324MHzテストステーション用と交換した。当該コイル電源は短時間の運転には支障がなく、現在も324MHzテストステーションで使用している。

3.2 高圧直流電源1号機の故障

3.2.1 故障発生から運転再開までの経緯

今年3/22(木)早朝(4:10)、HVDCPS#1がHV downした。「交流過電流」、「直流過電流」のインタロックが働いており、再立上げ時に三相6.6kV系のメータを確認したところ、直流電圧が100kVに到達する前に三相電流が約60Aまで振れるのが確認された(正常時は直流電圧100kV以上で20~30A程度)。リニアックのビーム加速運転を中止し、低電圧を印加して各部の波形を確認した結果、HVDCPS#1内の変圧整流器(HVTR#1)絶縁油タンク内部の故障が疑われた。

図2にHVTR#1の構成図を示す。HVTRの上流には高圧受電盤、降圧変圧器、AVRがある。三相6.6kVの電力を高圧受電盤で受電した後、 $\Delta/\Delta-Y$ で構成される降圧変圧器で600Vに降圧し、かつ位相差(変圧器2次側のu1-u2間、v1-v2間、w1-w2間)が-30degずつの2つの三相交流に変換する。AVRと変圧整流器内のダイオード、変圧器(HVTR#1の場合はTR1~3の3台)の構成によって、サイリスタ点弧位相角の調整でTR1~3の2次側電圧が制御され、制御方式は12パルス整流方式(三相全波整流2直列)である。HVTR#1はHVTR#2以降と異なり、80kV回路(RFQステーションに電圧印加)、110kV回路(DTL1~3各ステーションに電圧印加)の2出力であり、各出力端子はコンデンサバンク、クローバ装置、クライストロンに繋がっている。更に80kV回路は直流リアクトル40Hとコンデンサバンク6.4 μ F、110kV回路は直流リアクトル13.3Hとコンデンサバンク19.2 μ Fで各々10Hzの共振回路を構成している。

低電圧印加による波形測定等を行い検討した結果、

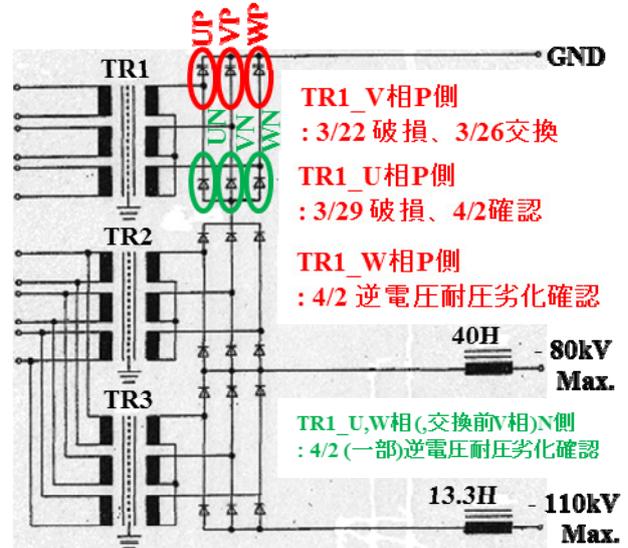


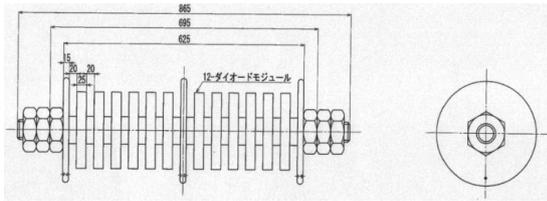
図2：変圧整流器HVTR#1構成図と不具合発生箇所

TR1_V相P側のダイオードの破損が疑われ、また予備のダイオードスタックが1台あったので、J-PARC内で交換する事となった。但し、HVTR#1は天井クレーンの無いリニアック棟クライストロン高圧電源室#1にあったので、3/23(金)に搬出準備、3/24(土)HVTR#1をクライストロン高圧電源室#1から屋外に搬出、大型トラックでクレーンのある空洞搬入調整室へ搬入、3/24(土)~26(月)HVTR#1油タンク内部をクレーンで吊り上げ、内部を確認した。予想通りTR1_V相P側のダイオードが破損していたので(破損状況の一例は図3参照)、予備のダイオードスタックと交換した。その他、油タンク内部の部品の目視確認、耐電圧試験では異常が無かった。

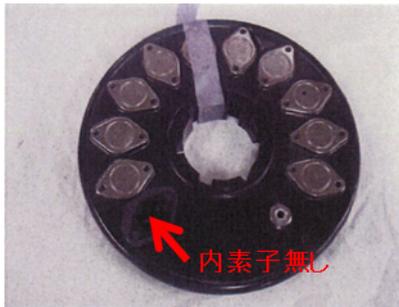
3/27(火)、28(水)にHVTR#1を復旧し、クライストロン高圧電源室#1に戻して再配線等を行った。

3/29(木)試運転等を経て100kV出力試験を行ったところ、100kV到達2~3秒後に「直流過電流」のインタロックが働いてHV downした。低電圧を印加して各部の波形を確認した結果、今度はTR1_U相P側のダイオードの破損とみられた。

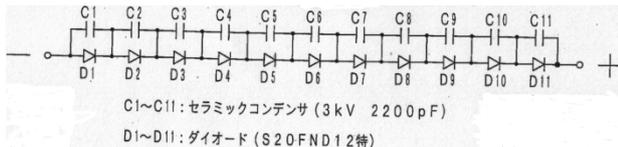
早急に再立ち上げするため、HVTR#1を取り除き、HVTR#11号機(400MeV増強用、クライストロン高圧電源室#2に置かれていた)を代用する事となった。HVTR#11号機は(#1号機のように80kVが無く)110kV出力のみであるため、RFQステーションで使用していたクライストロンを、特性を考慮して交換する事となった。3/30(金)HVTR#1、#11の運搬準備とクライストロンの交換、3/31(土)HVTR#1の搬出、4/1(日)HVTR#11の搬入と再配線、4/2(月)HVDCPS#1、HVTR#11を含めた181MeV加速用機器の試運転の後、4/3(火)から終夜連続運転が再開された。以後、4/5(木)リニアックビーム加速が再開され、4/8(日)ユーザーへの供用運転が再開された。その結果、当電源システムは



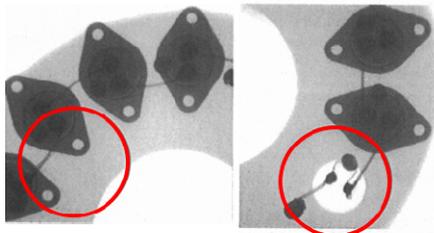
(a) ダイオードスタック全体図(12個のダイオードモジュールで構成)



(b) ダイオードモジュール (破損品)



(c)ダイオードモジュール回路図



(d) ダイオードモジュール X線透視像 (○内に破損痕跡を確認)



(e) セラミックコンデンサ分解写真

図 3 : ダイオードスタック、ダイオードモジュールの構成と破損品の例(交換前の TR1_V 相 P 側、P 端から 6 番目のモジュールの例)

12 日間停止、リニアックのビーム加速は 14 日間中断、ユーザーへの供給運転は 17 日間中断した。

HVTR#11 には 80kV 回路が無い、HVDCPS#1 ではコンデンサバンク 6.4 μ F は使用せず、19.2 μ F に 4 回路を接続している(他の HVDCPS は 25.5 μ F で、HVDCPS#1 の現状は約 25%少ない)。MLF 供給運転中の電圧サグを測定したところ、DTL1~3 ステーションにおいてパルス幅約 680 μ s で平均 4.2% (RFQ ステーションはパルス幅約 590 μ s で 4.0%)、比較のため SDTL10 においてパルス幅 648 μ s で 3.5%であり、約 0.7%、DTL1~3 が大きくなっている。今年 4 月から 7 月までの運転では、LLRF フィードバックで電圧サグによる RF 出力の変動を補正して運転を行った⁶⁾。

3.2.2 故障原因の考察

3/29(木)の 2 度目のダイオード破損を受け、4/2(月)改めて HVTR#1 の耐電圧等を確認したが不具合は見られなかった。そこでダイオード自体が既に損傷を受けていて、試運転中に耐電圧不良を起こした可能性があると考え、HVTR#1 用のダイオードスタック全てを取外して解体し、1 スタック内 12 個のダイオードモジュールの外観確認、逆電圧を印加しての耐電圧測定、等を行った。最初に壊れた TR1_V 相 P 側、2 度目に壊れた TR1_U 相 P 側のダイオードモジュールは、どちらも 6 個中 5 個がモールドケースの割れやダイオード素子(S20FND12 特)の分離が見られ、6 個全てが逆方向短絡していた。その他のダイオードモジュールは外観上異常は無かった。最初に壊れた V 相は N 側も 6 個全てが逆方向短絡または逆電圧耐圧不良(30kV 未満)、U 相 N 側も 6 個中 2 個が耐圧不良だった。W 相は P 側 4 個、N 側 3 個が短絡または耐圧不良だった。これらの結果により、2 度目の破損については、3/22(木)の V 相破損時またはその後試運転を繰り返した時にすでに U 相ダイオードがダメージを受けており、3/29(木)の試運転時に破損したと考えられる。なお、TR2、TR3 のダイオードは全て正常だった。

解体したダイオードモジュールを製造業者のオリジン電気(株)に送付し、調査を依頼した。その結果ダイオードに並列接続されたセラミックコンデンサの幾つかに破損が見られた(図 3 参照)。現在のところ故障について、最初にセラミックコンデンサに耐電圧を上回る電圧が印加され、コンデンサが破損し、最終的にダイオードモジュールの故障(外観破損、短絡、逆電圧耐圧不良)が発生する、というプロセスが有力視されている。

しかし、3/22(木)に発生したダイオード破損の原因(セラミックコンデンサに過電圧がかかった原因)はまだ解明されていない。また HVTR#1 は廃棄する事となった。

HVTR#2~#6 のいずれかについて、今夏シャットダウン中に油タンクを開けダイオードの点検を行う事も検討したが、出力設定電圧や運転時間などを考慮して故障の可能性の高いものを選び出すのは

困難なので(一方、5台すべてを点検するのは時間的、予算的に不可能)、今夏は行わないことになった。他方、HVTR#1の故障で長期にわたり加速器が停止した反省を踏まえ、HVDCPS#11用1台と、予備用1台を購入する事となった。

3.3. 運転状況その他

直流電圧(クライストロンカソード電圧)について、HVDCPS#1、#2が不安定、HVDCPS#3～#6が安定であるのは震災前と同様¹⁾だったが、今年に入りHV down後再立ち上げをした時、down前より高電圧が発生(6～7kV上昇)してクライストロンイオンポンプ過電流により再度HV downする現象がHVDCPS#1、#2で起こった。設定電圧を下げて運転を継続したが、原因はHVTRで電圧をモニターする分圧抵抗器の低抵抗側(気中)であると考え、今夏シャットダウン中に抵抗器を取替える予定である。

再開から今年7月2日シャットダウンまでの当電源システムの高電圧印加時間は4,900～5,700時間である。

4. エネルギー増強に向けて

最後に181MeV-400MeVエネルギー増強に向けた今年度の作業を報告する。

当電源システムの機器は震災前に主なものが納品されており、震災後から現在まで配線作業や試運転などが行われた。

配線等の作業は昨年10月下旬から12月中旬まで行われ、新規機器間の配線(HVDCPS#6～400MeV DEB#2間配線、等)の他、HVDCPS#6号機を4負荷運転するためのコンデンサ増設(6.45 μFから25.8 μFへ)などが終了した。

試運転調整は今年初めから6月上旬まで行われた。現在HVDCPS#7号機は181MeV運転対応でクライストロンギャリ側の機器が揃っておらず、イグナイトロンも未装着で試験が行われていない。HVDCPS#11号機は上述の通りHVTRが無い状態である。こうした状況を踏まえながら、シーケンス試験、耐電圧試験を含めて実施可能な試験を終了した。

5. まとめ

J-PARC リニアック用クライストロン電源システムについて、震災復旧から現在までの過去1年間の状況を報告した。

イグナイトロンの回復や高圧直流電源故障など、これまで経験したことが無く、かつ予想もしなかった状況が生じたが、1つ1つ取組みながら現在に至っている。HVTR ダイオード破損の原因については今後も検討が必要である。

現在の夏季シャットダウンの後、来年(2013年)7月末までの連続運転が予定されており、その後181MeV-400MeV エネルギー増強が行われる。いずれも新しい試みであり、これらについては来年、再来年の本研究会で報告する予定である。

参考文献

- [1] 川村 他, 2011年度本研究会 Proceedings, TUPS157. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS157.pdf
- [2] M.Kawamura, et al., Linac10 Proceedings, pp.887-889. <http://epaper.kek.jp/LINAC2010/papers/thp058.pdf>
- [3] 川村 他, 2009年度本研究会 Proceedings, pp.1062-1064. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/fpaca46.pdf
- [4] 千代 他, 2010年度本研究会 Proceedings, pp.936-938. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/fpaca46.pdf
- [5] 千代 他, 本研究会, THPS105.
- [6] ニツ川 他, 本研究会, WEPS124.
- [7] 川村 他, 2001年度リニアック技術研究会 Proceedings, pp.204-206. http://www.pasj.jp/web_publish/lam26/PDF/1P-27web.PDF
- [8] イグナイトロン(National Electronics, NL7703EHVNP)のWebカタログ <http://www.rell.com/filebase/en/src/Datasheets/NL7703EHVNP.pdf>
- [9] 堀 他, 本研究会, THPS109.