

NADH センサーを用いた 風量制御による 窒素除去法に関する研究

1. はじめに

福岡市は、博多湾の窒素・りん的环境基準類型指定への対応として、平成10年度に県と共同で「博多湾特定水域高度処理基本計画」を策定し、高度処理の検討に着手した。平成5年度から先行して実施していたりん除去に関する高度処理事業を平成11年度に整備完了し、平成10年度から窒素除去の調査研究を開始し、平成19年度に担体利用 A_2O 法を一部導入し、運用を行っている。しかしながら、施設改造と維持管理を含めて少しでも低コストで目標水質を達成しうる処理技術が、さらには、近年の CO_2 排出量の低減に寄与するような処理技術が求められている。このような状況の中、10年ほど前から欧米、韓国にて採用実績が増えているNADHを指標とした風量制御システムによる窒素除去法に注目した。

本法は硝化脱窒同時反応を利用することから、硝化槽・脱窒槽を設けず、また、硝化液循環が不要なことも特徴である。国内実績のない本法を福岡市に本格導入するために、既設処理場の1系列に試験的に導入することとなった。

本研究では、高度処理基本計画に定められた処理目標水質を達成可能な運転条件や維持管理性、省エネルギー性等を調査・検証し、施設の改造、増設等を必要としない低コスト型の窒素除去法の確立を目的とする。

2. 研究体制

本研究は、福岡市からの受託研究として、平成21年度～平成24年度で実施予定である。

3. 研究内容

3.1 NADH と NADH センサー

NAD (ニコチンアミド-アデニン-ジヌクレオチド, nicotinamide adenine dinucleotide) は、有機物の代謝(脱水素反応)に必須の補酵素で、電子伝達体として機能する。さまざまな脱水素酵素の補酵素として機能し、酸化型(NAD^+)および還元型($NADH_2^+$)の2つの状態を取り得る。

NAD^+ は還元物質(糖質や脂質など有機物)の2個の水素により還元され、 $NADH_2^+$ になる。次いで、 $NADH_2^+$ は、電子伝達系で酸素(O_2)に電子を伝達し、酸化され NAD^+ に戻る。このように、 NAD^+ は、酸化還元反応において補酵素として水素を運搬する。 $NADH_2^+$ は、340nmの励起波長を吸収し、波長460nmの蛍光を発する。このことを利用して、脱水素酵素の活性の検査が行われている。これを光学センサーとしたものがNADHセンサーである。(厳密には、 $NADH_2^+$ センサーと書くべきであるが、NADHセンサーと記すことが一般化している。) NADHの量もしくは濃度測定値は、

好気反応時
の測定値

<

脱窒反応時
の測定値

<

嫌気反応時
の測定値

という関係になる。この関係を排水処理に利用することに関して、1990年頃から基礎研究が始まり、1995年頃には処理場への導入、2000年頃から窒素除去への利用となったようである。

NADHセンサーの特性を端的に表す回分実験(図3-1参照)によるとORPと逆位相を示し、安定した一定値を瞬時に示す特徴がある。

図3-1においても上記の好気・無酸素(脱窒)・嫌気時の測定値の大小関係が得られている。

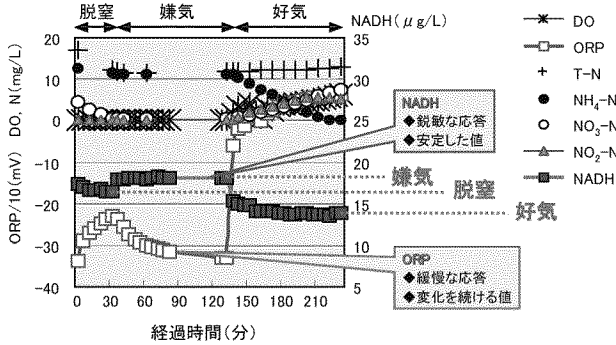


図3-1 回分実験におけるNADH, ORP, DOの変化 (横須賀市上下水道局 提供)

NADH, ORP, DO と同時硝化脱窒状態の関係概念を図3-2に示す。

NADHは、活性汚泥法フロック内の情報(1~5)であり、直接的に4になるようにDO(風量)を制御可能。ORP, DOは、フロック外部の液相の情報を検出し、内部を間接的に制御することになる。

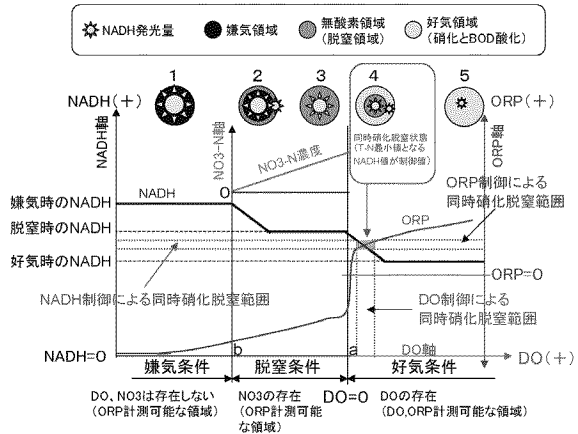


図3-2 NADH, ORP, DO と同時硝化脱窒状態の関係概念図

図3-2に示したフロック内の好気、無酸素、嫌気ゾーンの分布モデルは、例えば、図3-3に示すBaktiらによって提案されたモデルと同じと考えてよく、海外のNADHシステムのモデルでも同様な考え方を基礎としている。

図3-2によると同時硝化脱窒反応は、NADH, ORP, DOのいずれによっても可能なことになるが、実際には、次の理由によりORP, DOでは不可能ではないが、

困難である。

1) ORPセンサーの指示値に関する個体差が大きく、また、校正ができないので、継続的な使用による処理の安定性の確保が困難である。センサーを替えると最適な設定値を再度探索する必要がある。ORPの変動要因となるような流入水質の変化、変動があったときに、対応できない。

2) DOセンサーによるDO制御(DO一定もしくは可変制御の2通りが想定される)では、負荷変動への対応が困難である。

例として、硝化細菌と脱窒素機能を有する通性嫌気性微生物を含む微生物フロックが浮遊しているとすると、この微生物フロック内部における酸素濃度分布、溶存酸素の存在しない脱窒反応領域、溶存酸素の存在する硝化反応領域は、図3-3を簡略して図3-4のように、イメージすることができる。

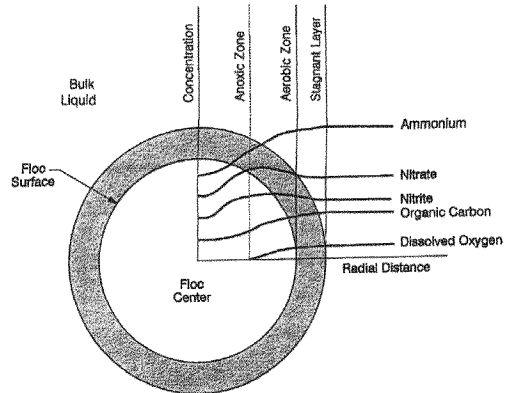


Figure 4.2 Illustration of substrate concentration profiles within a microbial floc showing simultaneous nitrification and denitrification. (Reprinted from Water Research, Vol. 26, Bakti, N.A.K., and Dick, R.J., A Model for a Nitrifying Suspended-Growth Reactor Incorporating Intraparticle Diffusional Limitation, p. 1681, Copyright 1992, with kind permission from Elsevier Science Ltd, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington OX5 1GB, UK.)

図3-3 硝化脱窒フロックモデル (※Biological and Chemical Systems for Nutrient Removal, P64, 1998)

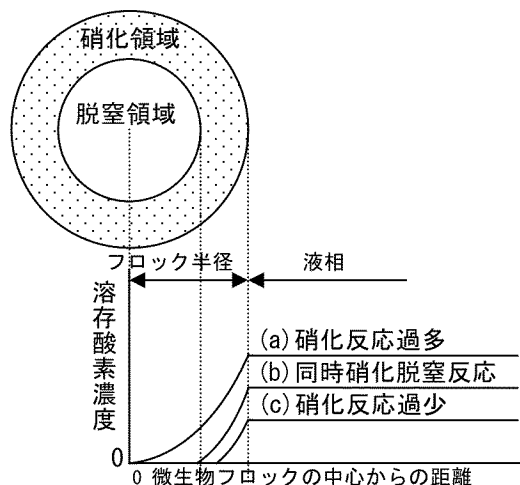


図 3-4 フロク内 DO 分布

曲線 (b) として示す溶存酸素濃度分布の場合、硝化反応がフロク外周域 (硝化領域) で生じ、その内部領域 (脱窒領域) で脱窒反応生じることから、この溶存酸素濃度分布 (b) が好ましい制御状態である。

曲線 (a) の場合は、溶存酸素がフロク中心部まで存在するため、硝化反応は生じるが、脱窒反応は生じない状況である。このときは送風量を下げることになる。

曲線 (c) の場合は、その逆の状況であり、送風量を上げることになる。

或る時刻の送風量によって好ましい溶存酸素濃度分布 (b) があったとしても、流入する排水中の酸素を消費する有機物やアンモニア性窒素の濃度は時々刻々変化するので、(a) や (c) に遷移しようとする。この遷移の状況を DO センサーでは把握できない。NADH センサーは、図 3-2 に示すように、この遷移状況を把握している。

3.2 同時硝化脱窒反応に関する過去の研究・報告例

上記のとおり、長期的維持管理性や、水質変動への同時硝化脱窒反応環境の維持には、ORP, DO 制御に課題はあるが、この反応に関しては、旧建設省土木研究所において昭和 60 年前後に浜松市の比較的小規模の処理場で観測され、制御による再現が試みられていた。その要旨を以下にまとめる。

1) 硝化内生脱窒法を採用している 3 処理場 (2 処理場は現在も稼働。1 処理場は廃止) の硝化槽でこの現象は確認されている。その結果は、図 3-5 のように「高度処理施設設計マニュアル (案)」221 ページ 図-4-3-14 に掲載されている。

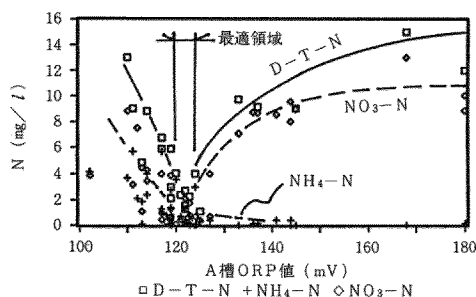


図 4-3-14 硝化タンクにおける ORP 値と窒素濃度との関係⁷⁾

図 3-5 高度処理施設設計マニュアル (案) 221 ページ 図-4-3-14

図 3-5 のデータを得た処理場のフローが図 3-6 である。

図 3-6 の処理場、及び他 2 つの処理場も流量調整槽により負荷変動が平滑化できれば、先に述べたセンサーに関わる課題はあるが、従来の制御でも同時硝化脱窒反応の生じることが図 3-7 に示されている。すなわち、

(a) 瞳ヶ丘処理場では、生物反応槽での全脱窒量の 77% が好気槽で脱窒されている。

(b) 館山寺処理場では、生物反応槽での全脱窒量の 73% が好気槽で脱窒されている。

(c) 湖東処理場では、生物反応槽での全脱窒量の 54% が好気槽で脱窒されている。

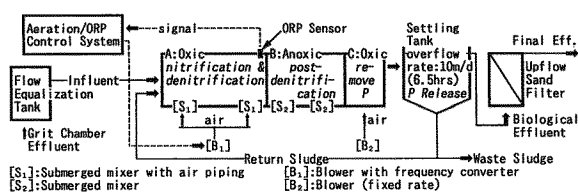
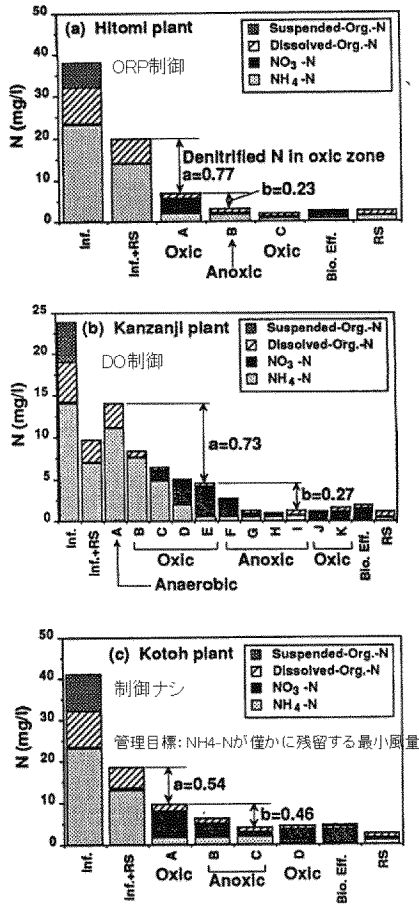


Fig. 1. Oxic-anoxic-oxic process for Hitomi plant.

図 3-6 硝化内生脱窒法に ORP 制御を適用した処理フロー (※Wat. Sci. Tech Vol. 28. No. 10. P. 378. 1993)



a = denitrification ratio in oxic zone
b = denitrification ratio in anoxic zone

図 3-7 同時硝化脱窒反応の割合
(※Wat. Sci. Tech Vol. 28. No. 10. P. 381. 1993)

3.3 NADH システム技術概要

3.3.1 システムの特徴

本システムの特徴は、次の3点に要約できる。

(1) 活性汚泥法ブロック内の硝化と脱窒のゾーン割合を NADH 値によって把握できるという特性を用いることで、ORP, DO センサーでは困難な同時硝化脱窒反応を制御する。

(2) ORP, DO センサーで同時硝化脱窒反応が不安定ながらも短期的には可能であったのは、基本的には完全混合単一反応槽、もしくは分割された反応槽で、負荷変動が平滑化された場合と考えられる。これに対して、本システムは、一般的な押し出し流れ型反応槽の標準活性汚泥法に適用可能であり、槽分割の有無は問わず、負荷変動に応じて送風領域別に曝気風量を変化させ、同時硝化脱窒反応を制御する。

(3) 上記の負荷変動に応じた必要曝気風量を送風するために、複数台のプロワーから構成されている送風設備の台数制御と出力制御を行う。これにより、常時、過不足のない風量と無駄のない電力消費を両

立させる。この仕組みが、単系列のみではなく、多数の反応槽を持つ大規模な既設処理場にも適用できる仕様となっている。

3.3.2 制御手法の概要

基本的な処理フローを図 3-8 に示す。

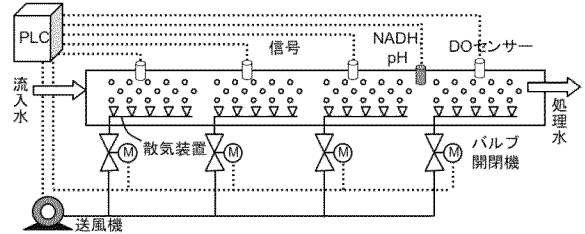


図 3-8 の NADH システム適用の基本型
(送風領域 4 つの例)

基本諸元

| | |
|---------|--|
| 反応槽 H R | 5~8 時間 (実績) |
| T | |
| 返送汚泥比 | 50 % (但し, MLSS3000mg/L, RSS8000mg/L での設計値) |
| S R T | 夏期 6~冬期 12 日 |
| 槽の区切り | 不要。隔壁があっても可。 |

3.3.3 制御判断 (硝化, 脱窒の状態判断) の概要

制御判断の概念図を図 3-9 に示す。送風量過大とは従来法の硝化槽の状況、送風量過小とは従来法の脱窒槽の状況に相当する。これら両状況の間には、図の中央に示す無酸素領域 (脱窒領域) と好気領域 (硝化領域) の混在するフロック状態が存在すると考える。その状態を安定的に維持する制御を行えば、硝化脱窒の同時進行可能な反応槽状態が得られる。

図 3-3 では、ORP, DO との関係の説明のために、NADH センサーにより 1~5 の状態 (DO 浸透状況のみで表現された。) を想定して説明したが、実際には、NADH が至適状態と判断されても、硝化反応の過不足もあり得る。この為、NADH システムの制御判断では、図 3-9 のとおり pH を硝化状況の判断指標に採用している。

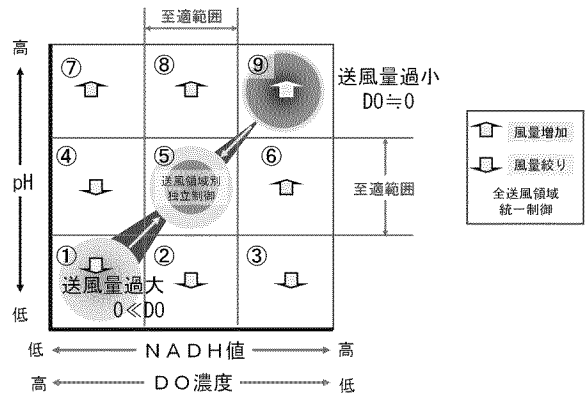


図 3-9 制御判断の概念図

この結果、至適領域を含めて9つの状態を想定することとなり、中央部からのズレの傾向をNADH軸とpH軸で構成されるマトリックス上で判断し、中央の状態5を維持するよう風量調節（バルブ開閉とブロワー群の台数と出力制御）が行われる。

pHを硝化判断の指標としたのは、以下の化学量論的な根拠に依る。硝化反応では硝化されるアンモニア性窒素1mg当たり排水中のアルカリ度が約7mg消費され、脱窒反応では脱窒される硝酸性窒素1mg当たり約3.5mgのアルカリ度が生成される。硝化と脱窒が同時に進行しているときには、これらの消費と生成の化学量論的計算から、硝化・脱窒同時反応により除去したアンモニア性窒素1mg当たり約3.5mgのアルカリ度が消費され、それに見合うpHの減少が観測できることになる。

この実例を図3-10に示す。好適なpHの範囲（図では、6.5～6.8）では、溶解性全窒素DTNが10mg/Lとなる事、この範囲を下回る（pH6.5未満）では、アンモニア性窒素は低濃度となり硝酸性窒素は高濃度であり、硝化過多であることを示し、従って脱窒反応が抑制されることからDTNも10mg/Lより高い濃度を呈する。

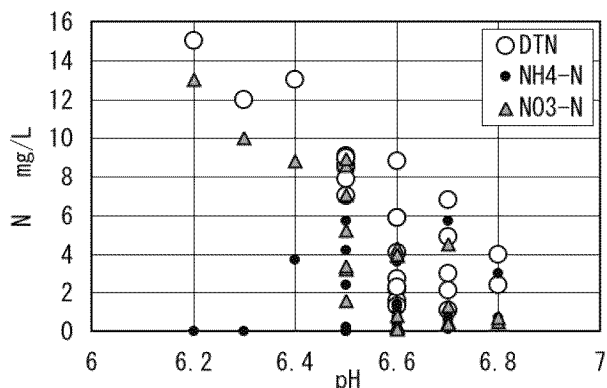


図3-10 pHと硝化レベルの関係例

なお、上記のpHの好適な範囲は、処理対象となる排水の処理前のpHや、含まれるアルカリ度、緩衝能によって変化するので、対象排水ごとに異なる。次項の制御に最適なNADH値の決定作業と同時に検討する。

このような現象からpHを測定することで、硝化反応が優先しているか、硝化と脱窒反応が同時並行的に進行しているか等の硝化と脱窒の同時進行の程度を判断できる。また、pHは、NADH、DOと同様にほぼリアルタイムで測定できるので、pHの測定値をNADHと共に制御プログラムに組み込むことに応答時間に関する制御上の問題はない。なお、硝化反応の対象水質成分であるアンモニア性窒素を直接計測できるアンモニアセンサの開発が進展しているので、将来

的には、これをpHに代わって利用することができると考えられている。

3.3.4 制御値の決定

溶解性全窒素DTNを最小化できるNADH値が存在する。図3-11では22である。このようなNADH値を維持するようブロワーの台数と周波数、ライザー管に付設する送風開閉バルブの開閉度等の連続的な制御を通して、反応槽全体で硝化と脱窒を同時に行うことができる。また、適切な必要最小限の風量となることで省エネルギー運転の窒素除去を可能にする。この制御値の決定は、処理場毎の設置調整として実施する。図3-11は、ORPによる制御で得られた図3-5と相似である。

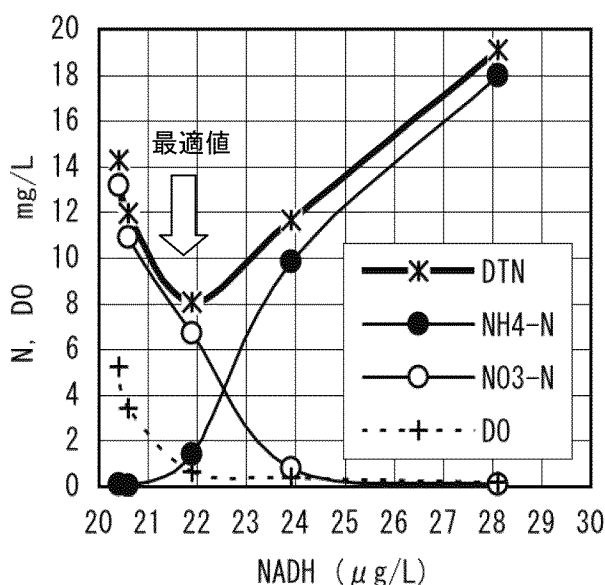


図3-11 制御に適したNADH値の決定 (DTN最小値となるNADH値を求める)

3.4 研究実施案

3.4.1 研究目的と目標

本研究における目的と目標は、次のとおりとしている。

NADHを指標とした風量制御システムによる窒素除去法を実規模施設に試験導入し、本法が下記目標を達成する処理方式であることを実証し、その処理方式に関する設計資料および運転管理資料を作成する。併せて、目標性能が確認された時点において窒素処理法としての認可を得る予定である。

表 3-1 処理目標水質

| 水質項目 | 目標水質 | 備考 |
|-------|------------|------------------------|
| T-N | 9 mg/L以下 | 博多湾特定水域高度処理基本計画の目標値 |
| T-P | 0.4 mg/L以下 | 博多湾特定水域高度処理基本計画の目標値 |
| CODMn | 10 mg/L以下 | 博多湾、特定水域高度処理基本計画の暫定目標値 |
| BOD | 10 mg/L以下 | 既設の処理水質レベル |
| SS | 10 mg/L以下 | 既設の処理水質レベル |

注) りん除去は、生物学的りん除去の原理を、本法に組み合わせるとともに、汚泥処理プロセスにおいてMAP法を用いてりん回収を図ることを前提としている。

3.4.2 研究対象系列の概要

本研究は、福岡市東部水処理センターの第3系列(既設:嫌気好気法)を一部改造して実施する予定である。

表 3-2 対象系列の概要

| 対象系列 | 東部水処理センター 第3系列 |
|--------|--|
| 処理方法 | 従来: 嫌気好気法 改造: NADHシステム |
| 計画処理水量 | 日最大: 16,700m ³ /日 (HRT 5.5hr) |
| 主な改造事項 | NADHセンサー, DOセンサー等の設置 風量制御システム制御盤 仮設ブロワー(実験系専用)及び電動弁の設置 |

実証実験のフローを図3-12に示す。ブロワーは小風量を確保すること及び予備を考慮して複数台設置する。センサー類は、反応槽の第3~7槽にDO計を設置し、第4, 6槽にNADH計, pH計を設置する。

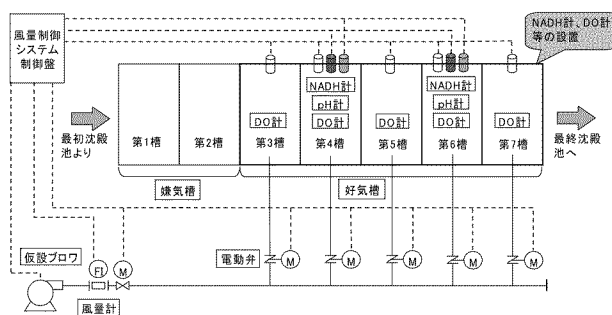


図 3-12 NADH システム系統図 (実証実験系列)

3.4.3 委員会予定

福岡市においては、当技術の性能が確認された時点において上記目標水質を達成可能な処理技術として下水道法事業認可を得る予定としている。

そのため、21年度水処理新技術実用化評価委員会および技術委員会においては、当該技術の必要性、実現性等の観点から審議を受け、実施設を用いた実証実験を実施するに相当と判断された。

22年度の両委員会においては、当技術の性能を確認する上で必要となる実験計画(調査内容, 調査手法, 調査頻度等)の妥当性について審議を受ける予定である。

23, 24年度は、実証実験の進捗に合わせて実験結果の審議を受ける予定である。また、最終年度には、設計資料および運転管理資料等の技術資料の審議を受ける予定である。

4. まとめ

今年度は実証実験に係わる調査検討を行った。主要な成果は、次の3点である。

- ①NADHシステム設計・適用に関する知見を集積した。(設計資料)
- ②NADHシステム適用時の運転管理, 維持管理に関する知見を集積した。(運転管理資料)
- ③新規性を検討・評価した。(新技術を先駆的に導入・評価する意義)

●この研究を行ったのは

研究第一部長
研究第一部副部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員

森田 弘昭
松葉 秀樹
江原 佳男
土田 俊彦

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長
研究第一部副部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員

森田 弘昭
松葉 秀樹
江原 佳男
土田 俊彦