

「福島第一におけるALPS処理水海洋放出 に向けた取り組み」

入野隆之* §

1. はじめに

トリチウムの水域環境・生体中の挙動については内外で多数の先行研究が行われ、生体内のトリチウム濃度は環境水の濃度以上とはならず、一定期間で平衡状態に達することが明らかにされている。また、放出水中のALPS処理水中のトリチウム（1,500ベクレル/L未満）の安全性については、科学的には担保されている。さらに当社や関係機関において、希釈放出前の濃度測定や海域モニタリングなどを通じて放射性物質濃度を数字として公表している。それでもなお、安全性を心配するご意見をいただいていることから、ALPS処理水を添加した海水で海洋生物を飼育することにより、目に見える形で海洋生物に影響がないことを示すために、2022年3月より海洋生物飼育試験に着手した。

2. ALPS処理水を用いた飼育試験

1) 飼育装置および飼育方法

飼育対象生物には、魚類としてヒラメ*Paralichthys olivaceus*、無脊椎動物としてエゾアワビ*Haliotis discus hannai*、藻類としてホンダワラ*Sargassum fulvellum*を選定した。また、飼育開始時点ではALPS処理水を外部に排出できないことから、閉鎖循環式で飼育を実施した。

容量約1トンの角形飼育槽4基、約0.5トンの角形飼育槽1基、海藻培養槽2基（容量約0.3トン円筒水槽および0.4トン角形水槽）、硝化槽（容量約0.1トン円筒水槽×3基）、ばっ気塔（容量約0.1トン円筒水槽）、カートリッジフィルター（目合い100および10 μ m×各3）、紫外線照射装置、プロテインスキマー、水温調節装置（クーラー+ヒーター）からなる、総水量約4.5トンの閉鎖循環式水槽（第1図）4式を設置し、2式を通常海水飼育区（通常海水①および②）、2式をALPS処理水添加海水飼育区（ALPS処理水①および②）とした。硝化槽に充填したプラスチック濾材は、約2カ月

間、10mg-N/L塩化アンモニウム添加海水中で熟成させたものを用いた。

飼育海水には、福島第二原子力発電所港湾から採水し、フィルター濾過（50→20→1 μ m）した天然海水を用いた。ヒラメ（体重36±12g）は福島県栽培漁業協会から、エゾアワビ（殻長5.8±2.4cm）は北日本水産から入手した。2022年9月13～14日に計758尾のヒラメを飼育水槽に導入した。本飼育に先立ち実施した練習・訓練飼育において対応に苦慮した単生類寄生虫*Neoheterobothrium hirame*の持ち込みを防止するため、導入直前に3%食塩添加海水×60分間の塩水浴を行った。ヒラメの状態に問題がなく、水質も安定していることが確認できた2022年9月30日を試験開始日（試験0日目）とした。エゾアワビは2022年10月25～28日に計768個体を飼育水槽に導入した。ヒラメおよびエゾアワビは同一系統内の閉鎖循環水槽内で飼育した。ヒラメおよびエゾアワビには市販の配合飼料を定量給餌（ヒラメ；計測時の総体重の1～2%の飼料を、毎日一回からヒラメの成長に応じ週4回給餌；エゾアワビ；翌日に残餌を確認し、残餌がない場合は給餌量を増やして毎日給餌）した。

トリチウム測定用に生物を定期的に採材することにより供試尾数変動すると、生存および成長を比較・評価することが困難となる。そこで、2022年12月19～20日に、容量約1トンの角形飼育槽4基のうち1基にヒラメ50尾を収容し、その水槽からはトリチウム測定用のヒラメを採材することなく飼育を継続した。約半年後の2023年6月20～21日に計測を行い、生存および成長を比較した。

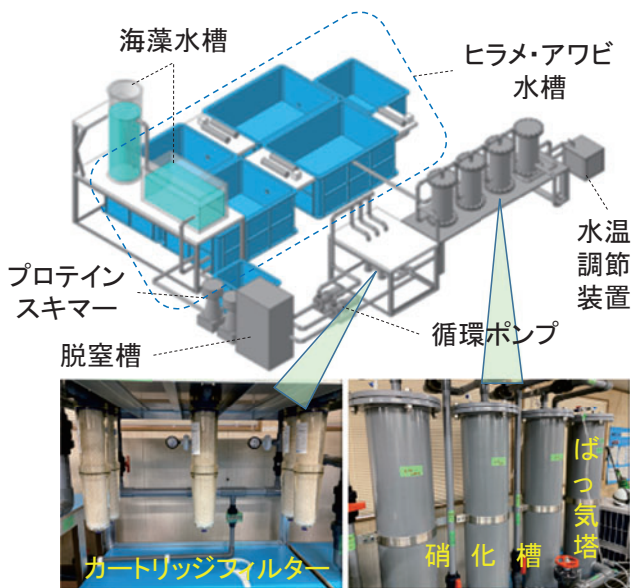
ホンダワラは2023年5月9日に福島第二原子力発電所地先から採取し2日間のトリチウム取り込み・排出試験を行った（長期間の栽培は行わなかった）。海藻に付着した微生物類がヒラメやエゾアワビに及ぼす影響が懸念されたため、ホンダワラは循環系統から隔離した状態の海藻水槽に収容して試験を行い、海藻水槽内の海水はホンダワラを取出し後、3カ月程度紫外線殺菌を行ってから循環系統に戻した。

水温は18℃設定とした。カートリッジフィルター内のフィルターは週3回新たなものに交換した。トリチウム飛散防止の観点から、ブローアに

* 東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニー プロジェクトマネジメント室（〒100-8560 東京都千代田区内幸町1丁目1番3号）

§ E-mail: irino.takayuki@tepcoco.jp

よる給気はばっ気塔内および海藻水槽内でのみ行った。飼育水の水質は第1表に示す方法で測定・調整した。飼育水の塩分および水位に応じ、天然海水または残留塩素を中和した水道水（いずれもALPS処理水を適宜添加）を補充した。硝化に伴いpHが低下した際には飼育水1トン当たり約200gのNaHCO₃を飼育水に添加した。試験45日目以降、容量約0.3トンの脱窒槽（オーシャンクリーナー N₂, S100, 大洋水研）を稼働させた。



第1図 飼育試験装置

第1表 測定した水質項目と測定方法

水質項目	維持する目安	測定方法	測定頻度など
水温	18℃	熱電対法	毎日1回
溶存酸素	飽和度80~100%	蛍光法	毎日1回
塩分	30~33	屈折率法	週1回、飼育開始時32
pH	7.5~8.1	ガラス電極法	毎日1回、飼育開始時8.1、硝化(アンモニア→硝酸)に伴い低下
アンモニア	0.5 mg-N/L以下	インドフェノール青法	週3回、硝化細菌の働きにより硝酸に酸化
亜硝酸	0.5 mg-N/L以下	ナフチルエチレンジアミン法	週3回、脱窒槽の働きにより大気中に排出
硝酸	50 mg-N/L以下	亜鉛還元法	週3回、脱窒槽の働きにより大気中に排出

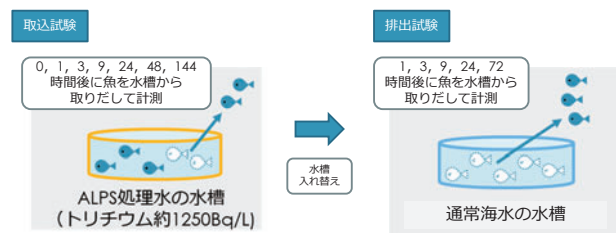
2) トリチウム取り込み・排出試験

生物中の組織自由水 (Free Water Tritium, FWT), 有機結合型トリチウム (Organically Bound Tritium, OBT) への移行測定は、前述の天然海水にALPS処理水を添加し、トリチウム濃度を1.3 kBq/Lに調製した環境中で飼育したものを測定した。

各海洋生物がトリチウムを取り込み、一定期間経過後に生育環境より低い濃度で平衡状態になることを検証するため、海洋生物をALPS処理水中に入れてからトリチウムの濃度を測定する【取込試験】を行った(第2図)。

その後、同一水槽の海洋生物を通常海水に入れてから、海洋生物がトリチウムを排出してトリチウム濃度が下がることを検証するため、トリチウム濃度を測定する【排出試験】を行った(第2図)。

またヒラメOBTの測定の試料は、概ね1~2か月程度の間隔で採取し、凍結乾燥後Ge半導体検出器によりγ核種濃度を確認した後、燃焼法によりOBT濃度を測定した。



第2図 取込・排出試験の例 (ヒラメFWT測定の場合)

3. 結果と考察

1) 生物飼育

飼育試験における飼育水の水質は、通常海水区とALPS処理水区でほぼ同等であった(第2表)。水温、溶存酸素飽和度、アンモニア、および亜硝酸は、概ね維持する目安(第1表)内に維持された。

pHは6.8～8.0，硝酸は0～206mg-N/Lの間で変動した。pHの低下および硝酸の上昇は，脱窒槽が十分に働かず，硝化によるアルカリ消費が脱窒によるアルカリ生成を上回る時期に生じた。これまでの閉鎖循環式でのヒラメの飼育に関する既存知見（本田ら，1994）から，本飼育試験における飼育水の水質は，ヒラメの生存および成長に影響を及ぼさない範囲に維持できたと考えられた。一方，アワビ類の飼育において，Leighton（2008）が理想的な水質はアンモニア1mg-N/L以下，亜硝酸0.5 mg-N/L以下，pH8.0～8.2，硝酸50mg-N/L以下，溶存酸素飽和度90%以上としている。本飼育ではほとんどの場合，上記の値をpHは下回り，硝酸は上回った。

約半年間の生存と成長を比較した結果，通常海水区とALPS処理水添加区との間に差異は認められなかった（第3表）。すべてのヒラメのうち，飼育期間全体（2022年9月30日～2023年10月12日：377日間）での死亡数は5尾であり，初期の導入数に対する生残率（トリチウム分析用に採材した尾数は考慮していない）は99%であった。死魚数は通常海水区（①，1尾；②，2尾）とALPS処理水区（①，0尾；②，2尾）で同等であった。死亡したヒラメには特段の感染症の兆候は認められず，目を怪我したことで摂餌が困難となり成長が劣った個体がほとんどであった。本飼育は現在も継続中であるが，死亡魚およびトリチウム測定用採材魚に*N. hirame*の寄生は認められず，水槽内から*N. hirame*の卵も確認されていない。

エゾアワビについては飼育期間中に死亡が継続した。飼育開始から350日間の生残率は，通常海水およびALPS処理水区ともに約50%であった。これまでに閉鎖循環式により長期間エゾアワビを飼育した事例は少ない。Park *et al.*（2008）は，送水量約60m³の循環濾過水槽を用い155日間の飼育を行った結果，88～92%の生残率を得ている。この値は本飼育での155日後での生残率86%と同等であった。本飼育における死因としては，前述したpHの低下および硝酸の蓄積が考えられ，脱窒槽の安定的な機能発揮が今後の課題となる。なお，エゾアワビの成長の評価については飼育期間中死亡が継続し，計測の際の剥離がさらなる死亡の原因となることが懸念されたため実施しなかった。

第2表 飼育試験における飼育水の水質

水槽	水質	水温(°C)	溶存酸素飽和度(%)	pH	アンモニア(mg-N/L)	亜硝酸(mg-N/L)	硝酸 [※] (mg-N/L)
通常海水	①	18.1±0.5	96±3	7.5±0.2	0.2±0.0	0.1±0.1	57±25
	②	18.1±0.4	92±4	7.5±0.2	0.2±0.0	0.1±0.1	66±40
ALPS処理水	①	18.0±0.4	92±3	7.5±0.2	0.2±0.1	0.1±0.1	67±39
	②	18.1±0.5	93±3	7.5±0.2	0.3±0.3	0.2±0.2	80±49

平均値±標準偏差で示した。
[※]、試験開始時～脱窒槽稼働前のデータを含む。

第3表 飼育試験におけるヒラメの生存と成長

水槽	生残率(%)	全長(mm)	成長率(%)	体重(g)	増重率(%)	給餌量(kg)	餌料効率(%)
通常海水①	100	220 ± 19	41	117 ± 31	180	9.06	116
		310 ± 29		328 ± 99			
通常海水②	100	219 ± 19	42	116 ± 32	176	9.06	113
		312 ± 35		320 ± 110			
ALPS処理水①	100	215 ± 19	46	118 ± 28	164	8.91	109
		314 ± 32		312 ± 96			
ALPS処理水②	98	219 ± 19	42	124 ± 33	159	8.78	117
		312 ± 31		321 ± 107			

各水槽に50尾を収容し、市販の配合飼料を0.9～2g/尾・日与え、184日間飼育した。全長および体重は、上段に開始時、下段に終了時の値を示した。
 成長率：(終了時のヒラメの全長-開始時のヒラメの全長)÷開始時のヒラメの全長
 増重率：(終了時のヒラメの体重-開始時のヒラメの体重)÷開始時のヒラメの体重
 餌料効率：(終了時のヒラメの総重量-開始時のヒラメの総重量)÷与えた配合飼料の量

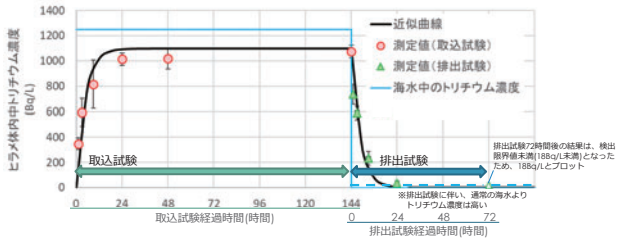
2) トリチウム濃度測定

各生物種におけるFWT濃度の経時変化を第3～6図に平均と標準偏差で示す。FWT濃度はばく露開始後24時間程度で飽和し，飼育水のトリチウム濃度を超えることはなかった。また，処理水を添加していない海水に移動した後24時間でFWT濃度は飽和値の10%以下まで低下した（第3図）。

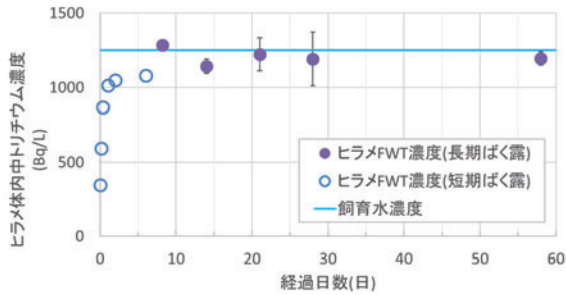
また，ヒラメのFWT濃度は上記の通り2日間で1.0 kBq/Lまで上昇した後，半年の間穏やかに上昇し，飼育水中濃度に等しい1.3 kBq/Lに至った。ヒラメFWTは交換が早い成分と遅い成分が存在していると考えられる（第4図）。

アワビおよびホンダワラのFWT濃度はともに1時間程度で飽和し，トリチウム無添加の海水に戻した後1時間程度で排出された。アワビの飽和FWT濃度は飼育水と同じ1.3 kBq/Lであったが，ホンダワラは1.2 kBq/L程度にとどまった（第5図，第6図）。

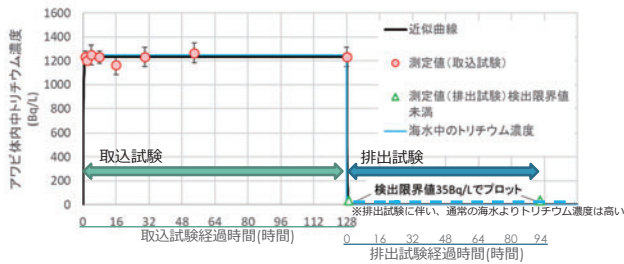
ヒラメ中OBT濃度は飼育期間単調に増加した。また， γ 核種は検出されなかった。現時点において，環境科学研究所（2014）が示した計算モデルにより予測される濃度と同程度であることが確認され，OBT濃度は既存の水素同位体へのばく露実験と同様の経過をたどると見込んでいる（第7図）。



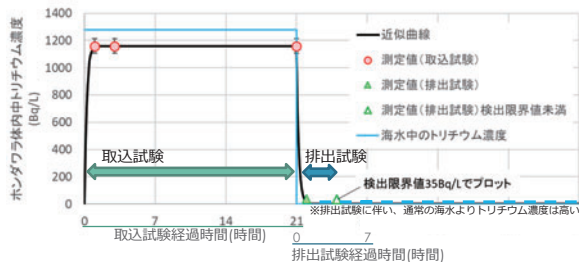
第3図 ヒラメのFWT測定結果（短期）※



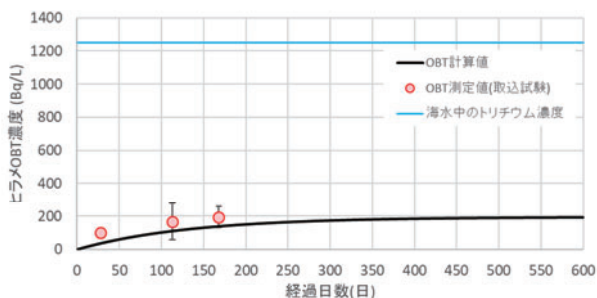
第4図 ヒラメのFWT測定結果（長期）※



第5図 アワビのFWT測定結果※



第6図 ホンダワラのFWT測定結果※



第7図 ヒラメのOBT測定結果※

4. おわりに

今後はヒラメのOBTについて、平衡に達するまで取り込み試験を行い、それに引き続き通常海水にヒラメを移しOBT排出試験を行う予定である。また、2023年8月24日に放出を開始したALPS処理水を含む海水を用いた海洋生物の飼育試験も行う予定である。

謝 辞

本試験の実施にあたり、近畿大学水産研究所教授 家戸敬太郎博士、海洋生物環境研究所ならびに電力中央研究所の関係各位には、海洋生物飼育に関する有益なご助言をいただいた。福島県栽培漁業協会の関係各位にはヒラメをご提供いただいた。茨城大学大学院理工学研究科教授 鳥養祐二博士、ならびに環境科学技術研究所の関係各位には、トリチウム測定などに関する有益なご助言をいただいた。東京パワーテクノロジー福島事業所、シガ環境、青田興業の関係各位には、海洋生物飼育に際して様々なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 本田晴朗・菊池弘太郎・渡部良朋・岩田仲弘・武田重信・植本弘明・古田岳志・清野通康 (1994) .ヒラメ用循環濾過養魚システムの設計と運用. 電力中央研究所報告, **U94018**, 1-29.
- Leighton, P. (2008). Abalone Hatchery Manual. *Aquaculture Explained*. **25**, 1-89.
- Park, J., Kim, P.K. and Jo, J.Y. (2008). Growth performance of disk abalone *Haliotis discus hannai* in pilot- and commercial-scale recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Int.*, **16**, 191-202.
- 公益財団法人環境科学技術研究所(2014). 平成26年度排出トリチウム生物体移行総合実験調査報告書. 公益財団法人環境科学技術研究所, 青森, 103-110.

※図中の各プロットは、平均値と標準偏差で示している。