

GŐZFEJLESZTŐ-CSÖVEK SZERKEZETINTEGRITÁSI VIZSGÁLATÁNAK MI-TÁMOGATOTT KIEGÉSZÍTÉSE

AI-SUPPORTED COMPLEMENT TO THE STRUCTURAL INTEGRITY INSPECTION OF STEAM GENERATOR TUBES

Kasó Ferenc Áron*, Dr. Zwierczyk Péter Tamás**

ABSTRACT

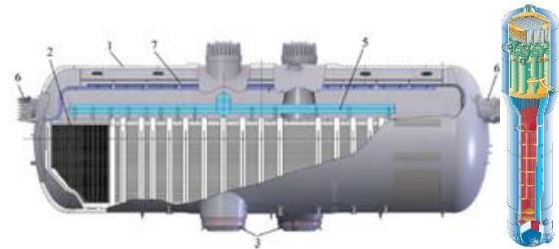
Integrity decisions on steam generator tubes rely on eddy current testing (ECT), which gives little information on the outer surface or on the damage mechanism, while secondary-side visual inspections are general surveys not directed at the ECT indications. This paper develops the concept of a remotely operated, ECT-guided targeted optical inspection for the secondary side. The inspection task is defined on the ECT target set, and five requirements are derived: traceability, position verification, image quality, foreign material exclusion and a strictly complementary role. A closed-form geometric analysis of the inter-tube lanes and of the usable circumferential arc shows that horizontal WWER (Water-Cooled, Water-Moderated Energy Reactor) bundles with in-line arrangement allow perpendicular viewing, whereas the interior of triangular-pitch vertical bundles practically does not, and that depth of field and glare, rather than resolution, limit image quality. A structured image data model and a staged validation strategy are proposed. Artificial intelligence (AI) is treated as an optional complement for image quality control, position identification and condition classification, subject to qualification. Finally, the need to develop the inspectability and monitoring into small modular and Generation IV reactors with longer fuel cycles and design lives is discussed, using the AP300 as an example.

1. BEVEZETÉS

A nyomottvizes atomerőművek gőzfejlesztőinek hőátadó csövei a primer és a szekunder kör közötti nyomáshatár részei, ezért integritásuk közvetlen nukleáris biztonsági kérdés. A hazai nukleáris iparban a téma elsősorban a Paksi Atomerőmű négy VVER-440 (BBÖP, Víz-Víz Energetikai Reaktor) típusú blokkja miatt alapvető: a blokkok biztonságos üzemeltetése és üzemidő-hosszabbítása a gőzfejlesztők, ezen belül a hőátadó csövek rendszeres állapotfelmérésére is támaszkodik [1]. A Paks II. projekttel a VVER-1200 típus gőzfejlesztői is megjelennek Magyarországon. Nemzetközi szinten a függőleges kialakítású U-csöves nyomottvizes blokkok mellett több kis moduláris reaktor (SMR), például az AP1000-alapú AP300,

valamint egyes negyedik generációs típusok is hasonló gőzfejlesztőkön keresztül adják át a hőt a szekunder körnek. A hőátadó csövek szerkezetintegritása ezekben a berendezésekben is a blokk teljes élettartamát meghatározó kérdés, bár az anyagok, az üzemi körülmények és a vizsgálati hozzáférhetőség típusonként eltérnek [2, 3]. A két alaptípust, a vízszintes VVER- és a függőleges U-csöves gőzfejlesztőt, az 1. ábra szemlélteti.

Az állapotfelmérés elsődleges eszköze az örvényáramos vizsgálat (Eddy Current Testing, ECT) [3], amely a csőfalról, illetve a csőfal hibájáról ad részletes információt, a külső felületről és a károsodási mechanizmusról azonban kevesebbet.



1. ábra WWER 1000 gőzfejlesztő PGV-1000MKP [4], Függőleges kilakítású gőzfejlesztő [5]

VVER-gőzfejlesztőkben a szekunder oldali vizuális vizsgálat legalább négyévente előírt, személyesen vagy távvezérelt kamerával [4]. Függőleges gőzfejlesztőkben az EPRI (Electric Power Research Institute) az idegen tárgyak keresését és eltávolítását (Foreign Object Search and Retrieval, FOSAR) az ECT-vel azonos leállásban, legalább a köpeny és a csőköteg közötti gyűrűtérben és a csőmentes sávban javasolja [6]. Ezek a vizsgálatok azonban áttekintő jellegűek, nem az ECT által kijelölt pontokra irányulnak.

A cikk célja egy ECT-vezérelt, célzott külső optikai vizsgálat koncepciójának kidolgozása a gőzfejlesztő hőátadó csöveinek szekunder oldali vizsgálatára. Ennek keretében megfogalmaztuk a vizsgálati feladatot és a vele szemben támasztott követelményeket, és elemeztük a módszer geometriai korlátait a különböző gőzfejlesztő-típusokban. A mesterséges intelligenciát (MI) a koncepció kiegészítő lehetőségeként vizsgáljuk: azt mutatjuk meg, hogy a strukturáltan gyűjtött felvételek milyen adat- és validálási keretek mellett támogathatják az MI-alapú képfeldolgozást.

* PhD hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék, kaso.ferenc@gt3.bme.hu

** egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék, z.peter@gt3.bme.hu

2. ECT-VEZÉRELT CÉLZOTT OPTIKAI VIZSGÁLAT

2.1. A vizsgálati feladat és a követelmények

A hőátadó csövek állapotáról hozott döntés több, egymásra épülő lépés eredménye. A vizsgálatot a jelek értékelése, a hibák osztályozása és méretezése követi, ezután a hibák idealizálása és az integritásszámítás következik, a folyamatot pedig a dokumentálás zárja. [1, 4]. Az örvényáramos vizsgálat korlátai régóta ismertek. A vezetőképesség vagy ferromágneses lerakódások, valamint a megtámasztások és más szerkezeti elemek jele elfedheti a hibajelet. Idegen tárgyak kimutatására jelenleg nincs általánosan minősített ECT-eljárás, ezért az iparági ajánlás a vizuális vizsgálati módszerrel való összehangolt alkalmazást javasolja. [7]. Vizuális vizsgálatot tehát már most is végeznek. Ami hiányzik, az egy olyan eljárás, amely az ECT által kijelölt helyekről igazolt pozíciójú, megismételhető felvételeket ad. A szekunder oldali vizuális vizsgálat tehát már része a gyakorlatnak, nincs azonban olyan eljárás, amely az ECT által kijelölt helyekhez igazolt pozíciójú, reprodukálható felvételeket rendelne.

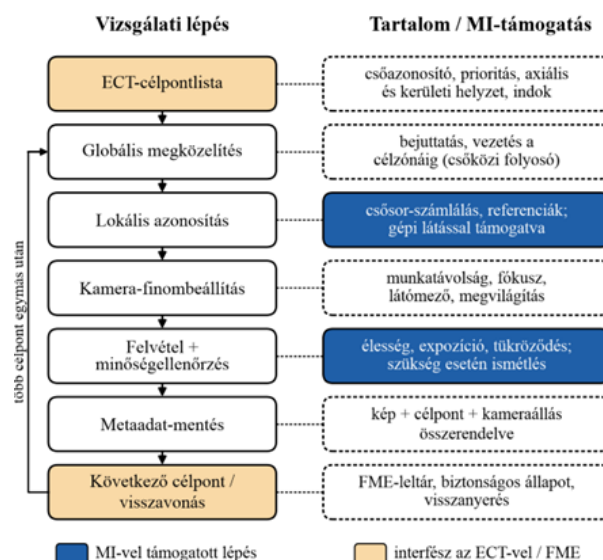
A célzott optikai vizsgálatnak az ECT által kijelölt, a szekunder oldalról hozzáférhető helyekről igazolt pozíciójú, minősített felvételeket kell szolgáltatnia, a felvételi körülmények dokumentálásával együtt. A rendszert leürített és lehűtött gőzfejlesztőben, mérsékelt dózisteljesítményű környezetben történő alkalmazásra kell kialakítani. Távvezérelt, félautomata üzemmódban kell működnie úgy, hogy az egyes célpontok felvételét az operátor hagyja jóvá. A vizsgálati feladatból és a fejezetben bemutatott korlátokból a rendszerrel szemben az alábbi öt követelményt fogalmaztuk meg:

- **K1** - nyomon követhetőség: minden felvételnek egyértelműen egy célpontoz és egy vizsgálati kampányhoz kell rendelhetőnek lennie,
- **K2** – pozíció igazolás: a felvétel helyét a hajtás helyzetjelétől független geometriai referenciákkal is igazolni kell,
- **K3** - képminőség: a felvételnek meg kell felelnie az előre rögzített élességi, expozíciós és lefedettségi kritériumoknak, hogy a kampányok között reprodukálható legyen,
- **K4** - idegenanyag-kizárás (Foreign Material Exclusion, FME) és visszanyerhetőség: a rendszert úgy kell kialakítani, hogy egyetlen eleme se maradjon a gőzfejlesztőben, meghibásodás esetén sem,
- **K5** - kiegészítő szerep: a rendszer nem végezhet biztonsági célú hibaméretezést; eredményeinek az ECT-indikációk értelmezését kell támogatniuk.

2.2. A vizsgálati folyamat felépítése

A vizsgálati folyamatot a 2. ábra foglalja össze. A berendezés mozgatója háromszintű: a globális pozicionálás a bejuttatástól a célzónáig, a lokális pozicionálás a keresett cső és a csőközi folyosó azonosításáig, a finombeállítás a kamera munkatávolságáig és optikai tengelyéig tart.

Lehetséges konstrukcióváltozatok a vezetősínes vagy vontatott endoszkópos fej, a karcsú csőközi platform és a külső manipulátorral vezetett optikai fej. Függőleges gőzfejlesztőkhöz csőkötegközi vizsgáló- és FOSAR-rendszerek már léteznek: a CECIL robot a vizsgálónyíláson át beépített sinen mozog, és hajlékony lándzsával juttatja a vizsgáló szondát a csőoszlopközökbe [8]. A koncepció újdonsága ezért nem a bejuttatás, hanem az ECT-célponttalhoz kötött, igazolt helyzetű vizsgálat és a nyomon követhető, strukturált képi adatszerkezet.



2. ábra Az ECT-vezérelt célzott optikai vizsgálat folyamata

2.3. Geometriai hozzáférhetőség és képkalkotási korlátok

A hozzáférhetőséget a csőköteg egyenes csőközi részei határozzák meg (1. táblázat). Ez a vízszintes VVER-gőzfejlesztők folyosós elrendezésében, illetve a függőleges gőzfejlesztők szabályos háromszög-osztásában a legszűkebb egyenes rés szélessége:

$$s_f = p - d, \quad (1)$$

$$s_h = \frac{\sqrt{3}}{2} p - d, \quad (2)$$

ahol s_f a folyosós, s_h a háromszög-osztású elrendezés legszűkebb egyenes résszélessége, p az osztás és d a csőátmérő. A 3/4 hüvelykes, háromszög-osztású kötegekben $s \approx 2,9$ mm, ami egyezik a csőkötegközi eszközök alsó határával [8].

1. táblázat Csőköteg-geometriák és a legszűkebb egyenes csőközi rés

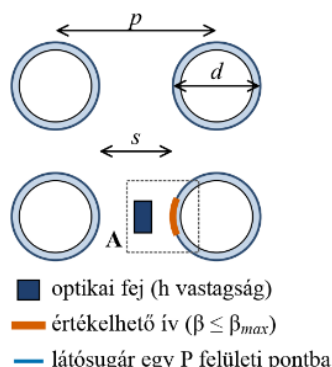
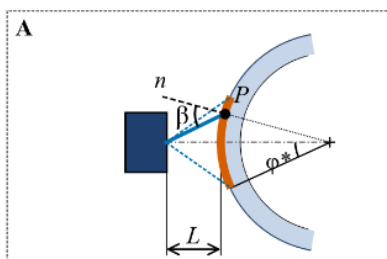
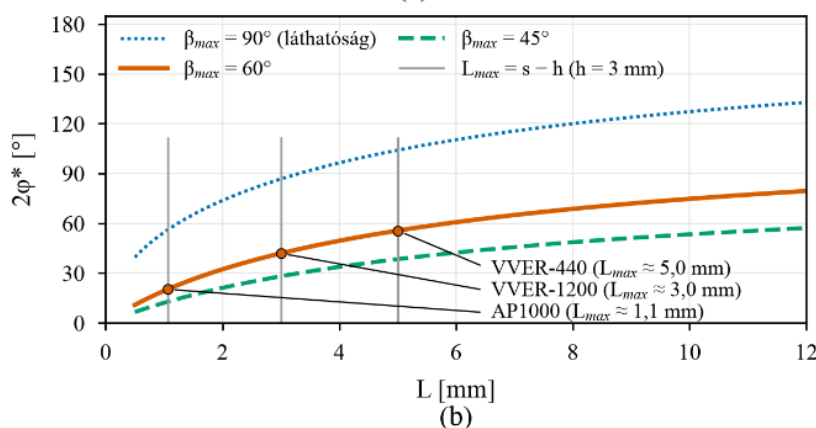
Gőzfejlesztő	Elrendezés	d / p [mm]	s [mm]
VVER-440 [9]	vízszintes, folyósós	16 / 24×29,5	8 / 13,5
VVER-1200 [10]	vízszintes, folyósós	16 / 22×24	6 / 8
PWR, 3/4"-os cső [11]	függőleges, háromszög	19,05 / 25,4	≈2,9
AP1000, AP300* [12]	függőleges, háromszög	17,5 / 24,9	≈4,1

* az AP300 csőgeometriája nem nyilvános, az AP1000-ével azonosnak feltételezve

$s = s_f$ (folyósós, két osztásirányban) vagy $s = s_h$ (háromszög-osztás)

A képkötés korlátjának jellemzésére tekintsük a résben elhelyezett kamerát, amelynek optikai tengelye merőleges a cső tengelyére, és amely a csőfaltól L távolságra van (3.a ábra). A palást egy pontja akkor értékelhető, ha a látósugár és a felületi normális által bezárt β beesési szög nem nagyobb $\beta_{\max}$ -nál; nagyobb szögnél a fémes felület tükröződése és a perspektivikus torzulás miatt a kép nem értékelhető. A cső középpontja, a felületi pont (P) és a kamera által alkotott háromszögre felírt szinusztételből az értékelhető ív φ^* fűlszöge ($R = d/2$):

$$\varphi^* = \beta_{\max} - \arcsin\left(\frac{R \sin \beta_{\max}}{R+L}\right), \quad (3)$$



3. ábra (a) Kamera a folyósós csőköteg részében;
 (b) az értékelhető ív $2\varphi^*$ szöge a munkatávolság függvényében, $d = 16$ mm

$\beta_{\max} = 90^\circ$ esetén (3) a geometriai láthatóság határát, $\varphi^* = \arccos(R/(R+L))$ értéket adja. A 3.b ábra szerint $d = 16$ mm, $L = 4$ mm és $\beta_{\max} = 60^\circ$ esetén $2\varphi^* \approx 49^\circ$, azaz egy felvétel a terület kb. 14%-át fedi le; a hozzáférhető oldal dokumentálásához ezért több nézet vagy kerületi pásztázás szükséges. Feltételezett $h = 3$ mm vastag optikai fejjel a merőleges nézet legnagyobb munkatávolsága $L_{\max} = s - h$: ez VVER-440-nél 5 mm (a másik irányban 10,5 mm), VVER-1200-nál 3 mm, AP1000-nél ≈ 1 mm, a 3/4 hüvelykes háromszög-osztásban pedig a fej el sem fér. A háromszög-osztású kötegek belseje így jellemzően csak a rés irányába néző ferde nézettel vizsgálható, nagy beesési szöggel.

A görbült palást miatt az értékelhető íven belül a munkatávolság Δz -vel változik, ami a szükséges mélységélességet adja; a felbontási követelmény (Δ) pedig a legkisebb vizsgálandó $a_{\min}$ jellemzőből és a jellemzőnkénti k képpontszámból adódik:

$$\Delta z = R(1 - \cos \varphi^*), \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{2L \tan(\alpha/2)}{N} \leq \frac{a_{\min}}{k}, \quad (5)$$

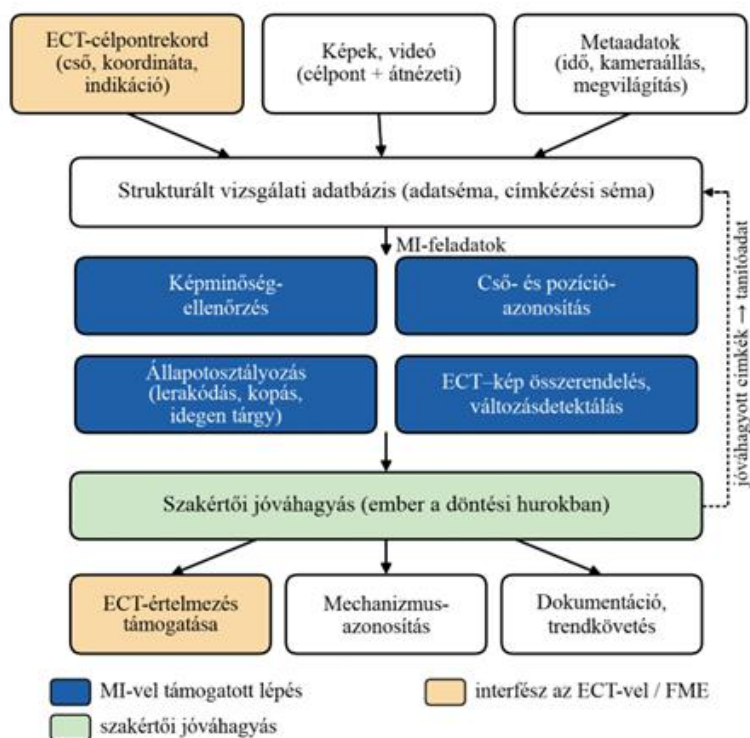
ahol α a látószög és N a képpontszám. Az előbbi példában $\Delta z \approx 0,7$ mm; $L = 4$ mm, $\alpha = 90^\circ$ és $N = 1600$ esetén $\Delta \approx 0,005$ mm. Közeli munkatávolságnál tehát a felbontásnál erősebben korlátoz a mélységélesség, a megvilágítás és a tükröződés. Az értékek szemléltető jellegűek; az optika kiválasztásához próbatesten végzett mérések szükségesek.

3. ADATMODELL, VALIDÁLÁS ÉS AZ MI ALKALMAZHATÓSÁGA

3.1. Képi adatmodell és a MI kiegészítő szerepe

A K1 és K3 követelmény teljesítéséhez minden felvételhez rögzíteni kell a célpontot, a felvételi körülményeket (időpont, kameraállás, munkatávolság, megvilágítás), a képminőségi jelzőt és a szakértő által jóváhagyott állapotot (4. ábra). Az így felépülő adatbázis MI nélkül is értéket ad: a felvételek visszakereshetők, a kampányok között összevethetők, és az ECT-indikációkkal összerendelhetők.

A csővizsgálati láncban a MI az ECT-jelek gépi értékelésében a legfejlettebb. A strukturált képi adatbázisra kiegészítő feladatként a képminőség-ellenőrzés, a cső- és pozícióazonosítás, az állapotosztályozás és a kampányok közötti változáskezelés illeszthető. Fényképekből a hibák hossza és szélessége jó közelítéssel becsülhető, mélységük azonban nem, ezért a mélység meghatározása az ECT feladata marad. Az automatikus elemzőket minősíteni kell, és minden algoritmusmódosítás újraminősítést igényel. A MI-funkciók ezért döntéstámogató szerepűek, az eredményeket szakértő hagyja jóvá.



4. ábra A képi adatmodell és a kiegészítő MI-feldolgozás

3.2. Alkalmazhatóság új blokkokban: SMR-ek és negyedik generációs típusok

A koncepció előnye, hogy a vizsgálat az ECT által kijelölt helyekre irányul, és az eredmények rendezett, visszakereshető formában kerülnek rögzítésre. Így az ECT-indikációkhoz a cső külső felületéről is információ társul, ami megkönnyíti a károsodási mechanizmus azonosítását, a téves jelzések kiszűrését és az elváltozások időbeli követését. A módszer korlátja, hogy a kamerával a falmélység nem mérhető, csak a hozzáférhető zónák vizsgálhatók (2.3. alfejezet), a sugárzás pedig csökkenti a kamerák élettartamát.

A kérdés jelentősége az új blokkoknál tovább nő. Az SMR-ek és a negyedik generációs típusok fejlesztésében a hosszabb üzemanyagciklus és a nagyobb tervezett

élettartam a jellemző irány. Emiatt ritkábbak a vizsgálati lehetőségek, miközben a gőzfejlesztőnek hosszabb ideig kell megbízhatóan üzemelnie. Nem elegendő ezért a meglévő vizsgálati eljárásokat utólag alkalmazni: a vizsgálati és monitorozó rendszereket a berendezéssel együtt kell fejleszteni, és ezt a tervezés szakaszában lehet a legegyszerűbben megoldani.

Az AP300 jól szemlélteti ezt. Az egyhurkos, AP1000-alapú blokknak egyetlen függőleges U-csöves gőzfejlesztője van, amelynek állapota közvetlenül a blokk rendelkezésre állását határozza meg [2, 12]. A négyéves üzemanyagciklus és a 80 évet meghaladó élettartam [2] mellett a szerkezeti hibák időben történő azonosítása és folyamatos monitorozása a hosszú élettartam biztosításának feltétele.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy ECT-vezérelt, célzott optikai vizsgálat koncepcióját mutatta be, amely a nyomottvizes atomerőművek gőzfejlesztőinek a szekunder oldali vizuális vizsgálatát az ECT által kijelölt célpontokhoz köti, és az indikációk helyéről igazolt pozíciójú, nyomon követhető felvételeket ad. A zárt alakú geometriai elemzés szerint a folyosós VVER-csőkötegek lehetővé teszik a merőleges nézetet. A strukturált képi adatbázis önmagában is értéket ad, és lehetővé teszi az MI-alapú képfeldolgozást, mint minősítéshez kötött, kiegészítő lehetőséget.

5. SUMMARY

The paper presented the concept of an ECT-guided targeted optical inspection that links the secondary-side visual inspection of pressurised water reactor steam generators to the target locations identified by ECT, and provides traceable images of the indication sites with verified position. The closed-form geometric analysis shows that VVER tube bundles with in-line arrangement allow perpendicular viewing. The structured image database is valuable in itself, and it enables AI-based image processing as a complementary option subject to qualification.

6. IRODALOM

- [1] KASÓ F. Á., ZWIERCZYK P. T.: *Gőzfejlesztő hőátadó csövek szerkezetintegritási értékelésének fejlődéstörténete a nyomottvizes atomerőművekben*, GÉP, LXXVI. évf., 3–4. szám, 2025, <https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.16>
- [2] WESTINGHOUSE: Regulatory Engagement Plan – Westinghouse AP300 SMR, SAPP-GWGLH-001 Rev. B, 2024, NRC ML24060A244
- [3] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION REACTOR DATABASE <https://world-nuclear.org/nuclearreactor-database/summary> [elérés: 2026.10.18.]
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*, IAEA TECDOC-1668, Bécs, 2011, ISBN 978-92-0-121410-2 https://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1668_w eb.pdf [elérés: 2026.10.18.]
- [5] Steam Generator Engineering Product Portfolio, <https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/steam-generator-engineering-product-portfolio/> [elérés: 2026.10.18.]
- [6] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE: *Steam Generator Integrity Assessment Guidelines Revision 3*, EPRI, Palo Alto, 2009 <https://www.nrc.gov/docs/ML1004/ML100480243.pdf> [elérés: 2026.10.18.]
- [7] U.S. NRC, EPRI SGMP: NRC / SGMP Steam Generator Task Force Meeting, 2018.01.23., NRC ML18022B105 <https://www.nrc.gov/docs/ML1802/ML18022B105.pdf> [elérés: 2026.10.18.]
- [8] QINETIQ: CECIL® – Consolidated Edison Combined Inspection and Lancing, termékismertető, <https://www.qinetiq.com/-/media/81d77d6127b64ebcabd3297f1611e93b.ashx?ver=e48b5ccee04a44049d5f0f49dbfdce14> [elérés: 2026.10.18.]
- [9] PELTONEN V.: Formation of hard magnetite deposits in simulated pressurised water reactor steam generator environment, MSc thesis, LUT University, Lappeenranta, 2022 https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164449/Master's_thesis_Peltonen_Veera.pdf?sequence=1 [elérés: 2026.10.18.]
- [10] LARSON A.: Belarusian Nuclear Power Plant Cuts Nation's Reliance on Natural Gas-Fired Electricity Generation, POWER Magazine, 2024.11.19. <https://www.powermag.com/belarusian-nuclear-power-plant-cuts-nations-reliance-on-natural-gas-fired-electricity-generation/> [elérés: 2026.10.18.]
- [11] U.S. NRC: St. Lucie Plant, Unit 2 – Review of the 2012 Refueling Outage Steam Generator Tube Inservice Inspection Report, NRC ML14013A247, 2014 <https://www.nrc.gov/docs/ML1401/ML14013A247.pdf> [elérés: 2026.10.18.]
- [12] WESTINGHOUSE: AP1000 Plant Description and Analysis Report, WCAP-15612, 2000, NRC ML003779406 <https://www.nrc.gov/docs/ml0037/ML003779406.pdf> [elérés: 2026.10.18.]