

Első mérések a TRITEL dozimetriai rendszerrel a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén

Hirn Attila^{*1}, Apáthy István¹, Bodnár László^{†2}, Csőke Antal¹, Deme Sándor¹,
Pázmándi Tamás¹, Szántó Péter¹, Zábori Balázs¹

¹MTA Energiatudományi Kutatóközpont, 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33.

²BL-Electronics Kft., 2083 Solymár, Sport u. 5.

*hirn.attila@energia.mta.hu

Title and Abstract – First Measurements with the TRITEL Dosimetry System on board the International Space Station

A three-dimensional silicon detector telescope (TRITEL) was developed at MTA Centre for Energy Research in the past years. The main objective was to measure not only the absorbed dose in the cosmic radiation field, but also the linear energy transfer (LET) spectrum of the charged particles and their average quality factor in three mutually orthogonal directions in order to give an estimation of the dose equivalent in tissue. Present paper addresses the main characteristics of the TRITEL system and the measurement results obtained during the first three days of its operation on board the International Space Station.

Keywords – space dosimetry, cosmic radiation, silicon detector telescope, space station, dose equivalent

Kivonat – Az elmúlt években egy háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp (TRITEL) fejlesztése folyt az MTA Energiatudományi Kutatóközpontban. A műszer fő célja, hogy a kozmikus sugárzás okozta elnyelt dózis mellett a töltött részecskék lineáris energiaátadási tényező (LET) spektrumát és az átlagos minőségi tényezőt is meghatározza három egymásra merőleges irányban, lehetővé téve ezzel a dózisegyenérték becslését is. Cikkünkben bemutatjuk a TRITEL dózismérő rendszer főbb jellemzőit, valamint ismertetjük a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén való működés első három napjának mérési eredményeit.

Kulcsszavak – űrdozimetria, kozmikus sugárzás, szilícium detektoros teleszkóp, űrállomás, dózisegyenérték

ŰRDOZIMETRIAI BEVEZETŐ

A kozmikus sugárzási tér

Az űrhajósokat a világűrben folyamatosan érő kozmikus eredetű sugárzás több komponensből tevődik össze, jellemzői helyről helyre és időről időre jelentős mértékben változhatnak. A galaktikus kozmikus sugárzást többnyire nagyenergiájú (tipikusan 10^8 – 10^{20} eV) és emiatt nagy áthatolóképességű, Naprendszeren kívüli eredetű töltött részecskék (83%-ban proton, 14%-ban alfa-részecske, kis gyakorisággal nehezebb ionok és elektronok) alkotják [1]. A galaktikus kozmikus sugárzásnál lényegesen lágyabb spektrummal (néhány eV – több ezer MeV) rendelkező szoláris sugárzást a főként protonokból és elektronokból, kisebb arányban a vasig bezárólag a protonnál nehezebb ionokból álló napszél alkotja. Fluxusa általában kicsi, azonban nagy napkitörések esetén a galaktikus sugárzás fluxusát három-négy nagyságrenddel is felülmúlhatja [2]. A kiáramló napszél a galaktikus eredetű kozmikus

sugárzással kölcsönhatásba lép, melynek eredményeképpen – a 11 éves periódusú napciklusnak megfelelően – modulálja a galaktikus komponensét.

Sugárvédelmi szempontból fontos szerepe van a geomágneses térnek is, amely a Föld közvetlen környezetében a kozmikus sugárzást alkotó részecskék egy részét eltéríti, illetve a mágneses erővonalak mentén befogja (sugárzási övek); ezzel bizonyos mértékű védelmet biztosít a földi élet számára. A főként protonokat befogott belső sugárzási öv, amely az Egyenlítő fölött 1,5–2,0 földmagmáyi távolságban található ugyanakkor – annak köszönhetően, hogy a Föld mágneses tengelye és a forgástengelye nem esik egybe – a dél-atlanti térségben 200 km-es tengerszint feletti magasságig is lenyúlik (Dél-atlanti anomália, DAA, [3]). Az űrhajósok a Nemzetközi Űrállomás (ISS) fedélzetén az elnyelt dózis akár 50%-át az – amúgy legfeljebb naponta összesen fél óra időtartamú – DAA-n történő áthaladások során kapják.

Az űrállomásokon és egyéb űreszközökön a szerkezeti elemek sugárzásgyengítő és konverziós hatása miatt a szekunder sugárzás aránya sem elhanyagolható. A primer sugárzás egy része az űrállomás falában elnyelődik, eközben (p,n) és (α ,n) magreakciók és spalláció révén másodlagos (ún. szekunder) neutronok keletkeznek, amelyekhez a felső légkörben hasonló magreakciókkal keletkező és onnan visszaszóródó (albedo) neutronok társulnak.

Az Föld felszíne felett közel 400 km magasan 51,6°-os hajlásszögű pályán keringő Nemzetközi Űrállomás fedélzetén az évi néhány napkitöréstől eltekintve a dózis jelentős része a galaktikus sugárzásból származik. Az átlagos elnyelt dózisteljesítmény a Föld felszínén mérhető elnyelt dózisteljesítménynél közel két nagyságrenddel nagyobb.

Dózisegyenérték alkalmazása az űrdozimetriában

A földi sugárvédelmi szabályozásban a sugárveszélyes munkahelyeken foglalkoztatottakat és a lakosság egyedeit érő sugárterhelés várható teljes sztochasztikus biológiai károsodásának jellemzésére az effektív dózist (E) alkalmazzák:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}, \quad (1)$$

ahol w_T és H_T a T szövet vagy szerv testszöveti súlytényezője, illetve az egyenérték dózis, w_R az R típusú sugárzás sugárzási súlytényezője és $D_{T,R}$ a T szövet vagy szerv átlagos elnyelt dózisa az R típusú sugárzásra [4][5].

Amint a fentiekben láthattuk, a kozmikus sugárzási tér jelentős részben nagy energiájú protonokból, alfa-részecskékből, valamint nehezebb töltött részecskékből áll. Az ICRP 60 [4] és az ICRP 103 [5] ajánlás szerint w_R értéke a 2 MeV-nél nagyobb energiájú protonokra 5, illetve 2, alfa-részecskékre és nehezebb töltött részecskékre pedig egységesen 20, így az egyenérték dózis alkalmazása az űrdozimetriában nem javasolt. Ehelyett a világ űrügynökségei a testszövetre vonatkoztatott dózisegyenértéket ($H_{T,Q}$) használják:

$$H_{T,Q} = Q_T \cdot D_T, \quad (2)$$

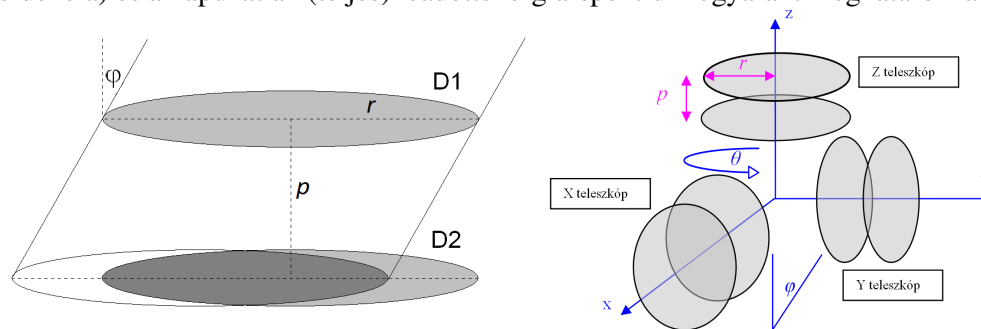
$$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \int \int_{m_T L=0}^{\infty} Q(L) D_T(L) dL dm, \quad (3)$$

ahol Q_T és D_T – az adott sugárzási térben – a T szövetben, illetve szervben az átlagos minőségi tényező és az elnyelt dózis, m_T az adott szövet, illetve szerv tömege, és $Q(L)$ a vízben mért nem korlátozott LET (L)-függő minőségi tényező és $D_T(L)$ a sugárzás L és $L+dL$ közötti LET értékű komponensének járuléka az elnyelt dózisban [6].

A KFKI-ban több mint 30 évvel ezelőtt kifejlesztett Pille termolumineszcens (TL) dózismérő rendszer, amely TL dózismérők úrrálomás fedélzetén történő kiértékelésére alkalmas, jelenleg is az ISS orosz szegmenségben szolgálati mérőeszköz [7]. Segítségével az elnyelt dózis becsülhető. A dózisegyenérték, illetve az effektív dózis becsléséhez ugyanakkor a sugárzási tér LET-spektrumának, illetve annak mélységbeli eloszlásának az ismerete szükséges. Ennek érdekében számos, szilícium detektorokat tartalmazó részecsketeleszkóp fejlesztése folyt, illetve kezdődött meg a Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpontban (MTA EK, korábban MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet) [8].

A TRITEL ŰRDOZIMETRIAI CÉLÚ HÁROMTENGELYŰ TELESZKÓP

Részecsketeleszkóp – a későbbiekben teleszkóp – alatt olyan, legalább két detektorból álló detektorrendszert értünk, amelyben egy töltött részecskén koincidencia- és/vagy antikoincidencia-kapcsolás segítségével több fajta mérést is el lehet végezni. Űrdozimetriai célú teleszkópokkal általában a detektor(ok) érzékeny térfogatában leadott energia mérhető, valamint meghatározható, hogy az adott részecske a teleszkóp geometriája által meghatározott térszögből érkezett-e. Félvezető detektoros rendszerek esetében leggyakrabban a két azonos aktív sugarú és vastagságú, átmenő típusú szilícium detektorból álló teleszkóp elrendezést használják, mint például a Kiegi Egyetemen fejlesztett DOSTEL esetében (1. ábra) [9]. Ezen típus jelentős hátránya a rendszer jelentősen irányfüggő érzékenysége. Ennek kiküszöbölésére az elmúlt években egy – a kozmikus sugárzás LET-eloszlásának időbeli és térbeli meghatározására alkalmas, a 4π térszögben közel egyenletes érzékenységgű – háromtengelyű teleszkóp (TRITEL) fejlesztése történt az MTA EK Űrdozimetriai Kutatócsoportjában a BL-Electronics Kft.-vel együttműködésben [10]. Az eszköz három ortogonális tengelyének teleszkópjait két-két, egymással párhuzamosan elhelyezkedő, $300\ \mu\text{m}$ vastagságú és $222\ \text{mm}^2$ aktív felületű szilícium detektor alkotja (1. ábra). A teleszkópokat alkotó detektorok szerepe kitüntetett; az egyik a mérő-, a másik az úgynevezett kapuzódetektor szerepét tölti be. A mindkét detektorban jelet adó részecskéket külön tudjuk mérni, vagyis az ún. kapuzott (koincidencia) és a kapuzatlan (teljes) leadottenergia-spektrum egyaránt meghatározható.



1. ábra: A két azonos sugarú detektorból álló teleszkóp, illetve a TRITEL háromtengelyű teleszkóp geometria felépítése; r a detektor aktív felületéhez tartozó sugar, p a detektorok közötti távolság

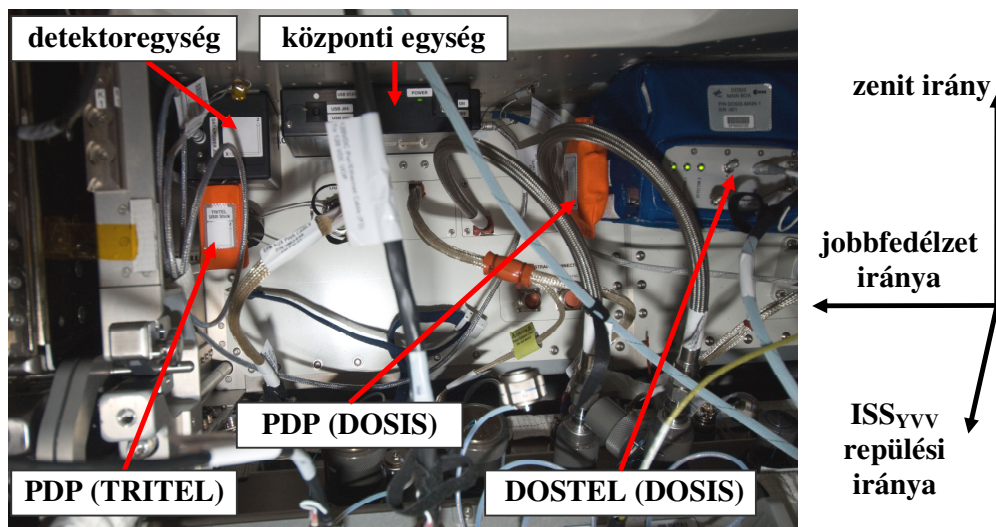
A kapuzott spektrumból a beérkezett részecskék LET-spektruma – azaz az egységnyi LET-re jutó részecskeszám – állítható elő, a detektorokban elnyelt teljes energiamennyiség pedig a detektor anyagának dóziséval arányos. A sugárzás LET-spektrumának ismeretében a szilíciumban mért elnyelt dózis testszövetre átszámítható. A rendszer a $0,2\text{--}120\ \text{keV}/\mu\text{m}$ $\text{LET}_{\text{váz}}$ értékű részecskék mérésére alkalmas, ami a detektorban leadott $60\ \text{keV}\text{--}80\ \text{MeV}$ energiának felel meg. A 128 csatornás, közel logaritmikus csatornabeosztású spektrumokat a

TRITEL egy 64 k-s lineáris amplitúdó analízátor kimenetének szoftveres átkódolásával állítja elő [11]. A műszer segítségével mind az elnyelt dózis, mind a kozmikus sugárzás biológiai károsító hatására jellemző dózisegyenérték becsülhető. A TRITEL által mért időspektrumok alapján a DAA-n való áthaladások közel valós időben azonosíthatók, így a napi leadottenergia-spektrumok a Dél-atlanti anomálián történő áthaladásokra, illetve a pálya többi szakaszára külön-külön meghatározhatók [12]. A műszer három tengelyének köszönhetően a sugárzási tér irányeloszlásának vizsgálatára is lehetőséget ad [13].

MÉRÉSI EREDMÉNYEK (2012. NOVEMBER 6–9.)

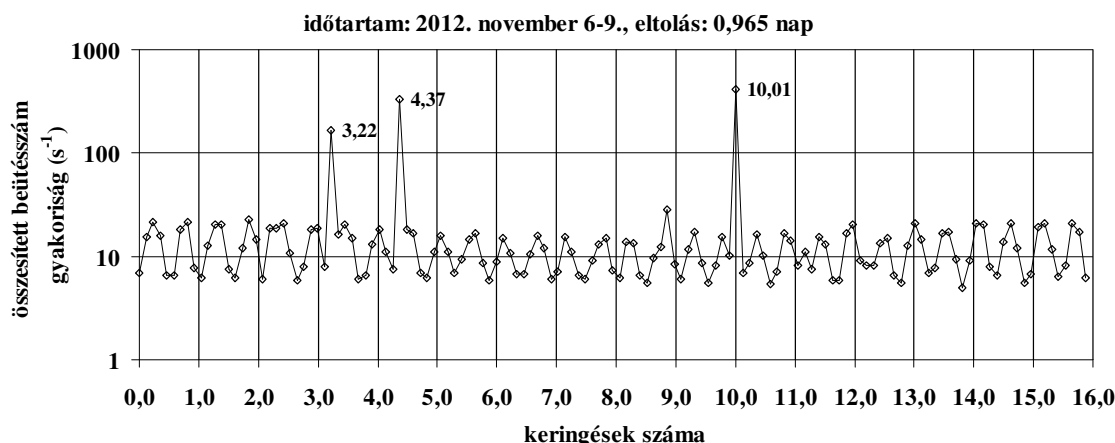
A BEXUS-12 [14], illetve -14 sztratoszférikus ballonok fedélzetén 2011 és 2012 őszén végzett sikeres hallgatói kísérleteket követően – 2012. október 31-én – a TRITEL űrállomásra szánt változata a Progress M-17M teherszállító űrhajó fedélzetén feljutott az ISS-re. A berendezés telepítésére és bekapcsolására november 6-án, az első adatletöltésre pedig három nappal később, november 9-én került sor. A TRITEL-SURE kísérlet nyom- és TL detektorokat tartalmazó összeállítása (Passive Detector Package, PDP) a Szojuz TMA-07M fedélzetén 2012. december 19-én érkezett meg a Nemzetközi Űrállomásra.

A TRITEL részegységei közvetlenül a – hasonló fizikai elven működő, de csak két irányban érzékeny, egy-egy félvezető teleszkópot tartalmazó – DOSIS kísérlet mellett foglalnak helyet az ISS Columbus Laboratóriumában található Európai Fiziológiai Modulban, így összemérésre is lehetőségünk nyílik. A kiel-i Christian Albrechts egyetemen fejlesztett DOSIS/DOSTEL kísérletnek – a TRITEL kísérlethez hasonlóan – része egy szilárdtest nyomdetektorokat tartalmazó csomag is (2. ábra).



2. ábra: A TRITEL-SURE és a DOSTEL kísérlet a Nemzetközi Űrállomás Columbus laboratóriumának Európai Fiziológiai Moduljában (fotó: NASA/ESA)

A TRITEL-ről letöltött adatokat ellenőrzés és tudományos kiértékelés céljából a Földre továbbították. A műszer belső műszaki állapotát leíró (idegen szóval housekeeping) adatok alapján az eszköz megfelelően működik. Egyúttal a mérési adatok részletes kiértékelése is megkezdődött. A mért időspektrumokon jól láthatók a Dél-atlanti anomálián való áthaladások okozta intenzitás növekedések, valamint felfedezhetők a 92 perces periódusú, a Föld megdölt mágneses tengelyének köszönhető változások. A 3. ábra a TRITEL három tengelyére összesített átlagos beütésszámokat mutatja az ISS Föld körüli keringése sorszámanak függvényében.



3. ábra: A TRITEL-SURE bekapcsolását követő első három nap átlagos, három tengelyre összesített beütésszám gyakorisága a keringések sorszámaának függvényében (az ISS keringési ideje körülbelül 92 perc)

Az 1. táblázat az első két teljes nap (2012. november 7. és 8.) méréseinek Dél-atlanti anomálián kívüli eredményeit foglalja össze. Az elnyelt dózisteljesítmények DAA-n belüli járulékra közel egyező értékeket kaptunk; a minőségi tényező értékét a kapuzott DAA-n kívüli spektrumokban tapasztalt memóriaszemét miatt nem sikerült meghatározni.

1. táblázat. Az elnyelt dózisteljesítmény DAA-n kívüli járuléka, valamint a DAA-n kívüli átlagos minőségi tényezők

Irányok	2012. november 7.		2012. november 8.	
	Elnyelt dózis- teljesítmény ($\mu\text{Gy/h}$)	$\langle Q \rangle$	Elnyelt dózis- teljesítmény ($\mu\text{Gy/h}$)	$\langle Q \rangle$
a repülési iránnyal ellentétes irány	123 ± 10	$3,4 \pm 0,3$	123 ± 10	$3,5 \pm 0,4$
balfedélzet iránya	147 ± 8	$3,2 \pm 0,1$	148 ± 8	$3,6 \pm 0,1$
zenit irány	121 ± 4	$4,5 \pm 0,2$	124 ± 4	$4,3 \pm 0,2$

A zenit irányra merőleges két irányban az átlagos minőségi tényező szignifikánsan kisebb. Ez valószínűleg a befogott részecskék járulékanak (a DAA átváltások esetleges hibáinak), a geomágneses levágás irányfüggésének, valamint a zenit irányban jelentősebb árnyékolásnak tudható be. A balfedélzet irányába mutató teleszkóp által mért dózisteljesítmény a másik két teleszkóp által mért értéknél nagyobb, melynek oka egyelőre nem tisztázott. Ezen eltérések vizsgálata további kutatást, illetve a DOSIS által mért adatokkal való részletes összevetést igényel. Ennek során kiértékeljük a kísérlet 2012. november 9. utáni mérési adatait is.

KITEKINTÉS

A TRITEL-SURE kísérlettel a tervek szerint 2013 májusáig végeznek méréseket a Columbus modulban; az összes mérési adat letöltésére, valamint a PDP visszahozatalára ekkor kerül sor. Ezt követően a TRITEL-SURE kísérlet detektoregysége a 2013 március 28-án a Szojuz TMA-07M űrhajóval az űrállomás orosz szegmensére felkerülő, immár több detektoregység kezelésére is alkalmas TRITEL-RS rendszert egészíti majd ki. A Pille és a TRITEL rendszerrel történő együttes mérések kivitelezését is tervezzük, melynek segítségével a TRITEL által kapott átlagos minőségi tényező a Pille adatok dózisegyenértékre történő konverziójához is felhasználható lesz.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TRITEL-SURE kísérlet az Európai Unió 6. Keretprogramjának terhére meghirdetett SURE program keretében (RITA-CT-2006-026069), a műszer fejlesztése és megépítése pedig a 98057-es számú ESA PECS együttműködésnek köszönhetően valósult meg. Köszönet illeti továbbá a kísérlet két külföldi társkutatóját, Sönke Burmeister (CAU, Kiel) és Günther Reitzet (DLR) a fejlesztés és a kiértékelés során nyújtott segítségükért és együttműködésükért.

IRODALOM

- [1] Cucinotta, F.A., Schimmerling, W., Peterson, L.E. et al., Space Radiation Cancer Risks and Uncertainties for Mars Missions. *Radiat. Res.* 156, 682-688, 2001
- [2] Kim, Y., Atwell, W., Tylka, A.J. et al., Radiation dose assessments of solar particle events with spectral representation at high energies for the improvement of radiation protection. F24-0005-10, 38th COSPAR Scientific Assembly, Bréma, Németország, 2010
- [3] Kivelson, M. G., Russel, C. T., Introduction to Space Physics. Cambridge University Press, Cambridge, 1995
- [4] ICRP 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, ICRP Publication 60, Vol. 21, Nos. 1-3, Pergamon Press, Oxford, 1991
- [5] ICRP 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, ICRP Publication 103, Vol. 37, Nos. 2-4, Elsevier, Amsterdam, 2007
- [6] Reitz, G., Astronaut's Organ Doses Inferred from Measurements in a Human Phantom Outside the International Space Station. *Radiat Res.* 171, 225–235, 2009
- [7] Fehér, I., Deme, S., Szabó, B., Vágvolgyi, J., Szabó, P.P., Csőke, A., Ránky, M., Akatov, Yu.A., A new thermoluminescent dosimeter system for space research. *Adv. Space Res.* 1, 61-66, 1981
- [8] Deme S., Apáthy I., Bodnár L., Csőke A., Hirn A., Pázmándi T., Szántó P., Zábori B., Szilícium detektoros teleszkópok a kozmikus sugárzás mérésére. *Sugárvédelem*, VI. évf., 1, 15-20, 2013
- [9] Beaujean, R., Kopp, J., Reitz, G., Active Dosimetry on Recent Space Flights. *Radiat. Prot. Dosim.* 85, 223-226, 1999
- [10] Pázmándi, T., Deme, S., Láng, E., Space Dosimetry with the Application of a 3D Silicon Detector Telescope: Response Function and Inverse Algorithm. *Radiat. Prot. Dosim.* 120, 401-404, 2006
- [11] Hirn, A., Apáthy, I., Bodnár, L., Csőke, A., Deme, S., Pálfalvi, J. K., Pázmándi, T., Szabó, J., Szántó, P., Development of a Complex Dosimetry Equipment for the Columbus Module of the International Space Station. ISSN 1995-6258, IAC-07-A1.9.-A2.7.01, 58th International Astronautical Congress, Hyderabad, India, 2007
- [12] Hirn, A., A Dél-atlanti anomálián való áthaladások időtartamának automatikus meghatározása a TriTel háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóppal. *Sugárvédelem*, II. évf., 2, 2009
- [13] Hirn, A., Models of performances of dosimetric telescopes in the anisotropic radiation field in low Earth orbit. *Acta Astronaut.* 66, 1368-1372, 2010
- [14] Zábori, B., Hirn, A., Pázmándi, T., Szántó, P., The CoCoRAD balloon-borne cosmic radiation and dosimetry measurements in the frame of the BEXUS programme. IAC-12-A1.4.16, 63rd International Astronautical Congress, Nápoly, Olaszország, 2012

A pályamű a SOMOS Alapítvány támogatásával készült